基于离散单元法的砂轮磨料粉体流动性研究

陈伟[1]，唐火红[1]，骆敏舟[2]，孙明迁[1]
（1. 合肥工业大学，合肥 230009；2. 中科院常州先进制造技术研究所，常州 213164）

摘要：目的 在不同摩擦因数工况下进行磨料粉体自由卸料的流动性研究。**方法** 根据粉体流动性评价方式，建立流动性表征指标；基于离散单元法原理，利用PFC3D软件建立料仓粉体自由卸料模型，仿真砂轮磨料在不同摩擦条件下的自由卸料运动过程；根据仿真结果，分析磨料粉体摩擦因数变化对其流动性的影响，利用表征指标评价流动性，建立流动性函数。**结果** 摩擦因数为0.4时，磨料粉体的流动性能最佳。**结论** 随着摩擦因数增大，砂轮磨料粉体流速减小，流动稳定性提高。

关键词： 磨料粉体；流动性；摩擦；离散元；仿真
中图分类号： TQ022　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1001-3563(2015)07-0067-04

Flow Performance of Grinding Wheel Abrasive Powder Based on Discrete Element Method

CHEN Wei[1], *TANG Huo-hong*[1], *LUO Min-zhou*[2], *SUN Ming-qian*[1]
(1. Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Institute of Advanced Manufacturing Technology, Chinese Academy of Sciences, Changzhou 213164, China)

ABSTRACT: Flow performance of abrasive powder of free discharge under different powder friction conditions was researched. According to the appraisal way of powder flow performance, the evaluation indexes of flow performance were extracted. Based on the Discrete Element Method(DEM), the model of free discharge of powder in silo was established with PFC3D software, which was used to simulate the free discharge process of grinding wheel abrasive under different powder friction conditions. According to the simulation results, the influence of variable abrasive powder friction coefficients on the flow performance was studied. The flow performance was appraised with evaluation indexes, and fluidity functions were established. When the friction coefficient was 0.4, the flow performance of abrasive powder achieved the best. With the increase of friction coefficient , the abrasive powder flow velocity decreased and the flow stability increased.

KEY WORDS: abrasive powder; flow performance; friction; DEM; simulation

配料生产线是磨具、冶金、水泥和化工等产品生产过程中的重要环节。在粉体配料工业生产过程中出现很多散体的送料效率低、卸料不顺畅等工程问题，这主要是由粉体的流动性问题引起的。粉体流动性的宏观特性具有多样性和多变性特点，粉体的基本物理性质对其宏观特性起着决定性作用[1]，因此需要找出粉体微观与宏观特性之间的本质关系，为有效解决生产过程中的实际问题提供帮助。

离散单元法(DEM)是基于牛顿第二运动定律，通过计算每一时刻粒子间的相互作用及相对运动来预测粒子群行为[2—5]。这里，首先根据粉体流动性评价方式，构建评价流动性能的表征指标；然后根据离散单元法，应用PFC3D仿真软件，建立料仓内砂轮磨料的三维模型，对不同摩擦因数条件下的磨料在自由卸料过程的粉体流动性进行仿真；最后根据仿真结果，研究粉体摩擦与流动性的关系，比较表征指标的敏感

收稿日期： 2014-07-31
基金项目： 国家自然科学基金(51275505)；江苏省科技支撑计划(BE2012062)；常州市科技局产学研项目(CF20130024)
作者简介： 陈伟(1989—)，女，安徽安庆人，合肥工业大学硕士生，主攻先进制造及其关键技术。
通讯作者： 唐火红(1973—)，男，安徽池州人，博士，合肥工业大学副教授、硕士生导师，主要研究方向为先进制造及其关键技术。

度，建立流动性函数。

1 粉体流动性表征

不同于液体的运动特性，由于粉体内部颗粒之间摩擦的存在，使得粉体颗粒的运动受到多方面限制。颗粒间的摩擦主要由颗粒间的相互啮合产生，颗粒间的摩擦越大，颗粒相对运动时耗损的能量也越多，动能就越低，流动性变差。通过不同的造粒方式，可以得到不同摩擦因数的磨料。

表征粉体流动性的方法有很多，常见的有测粉体休止角和列出其流动性函数，前者有较大的经验性，而后者实际操作较困难、不实用。总结粉体流动性的相关成果发现，粉体的流动性一般通过流动速度和流动稳定性等2个参数来表示。由于流动速度与流动稳定性是相互独立的[7]，因而需要将2个参数结合起来建立综合性的表征指标。

综合速度与稳定性因素，构建综合性的流动性表征指标 C_I：

$$C_I=f(U_S,S_f) \tag{1}$$

式中：U_S为卸料速度；S_f为卸料流速稳定性。

流动速度和流动稳定性这2个变量需经过处理才能添加到式(1)中，而处理方式不同，其表达形式也是灵活不唯一的。其中传统的处理方法是利用相对标准偏差($S_{RSD}=S/\overline{X}$)对变量进行调整，相对标准偏差直接反映了平均标准差的大小。综合表征指标确定为 C_{Io}：

$$C_{Io}=S_R/U_{SR} \tag{2}$$

式中：U_{SR}为流速；S_R为流速的标准差。

为更清楚地表达卸料的流动性状态，将由相对标准偏差转化而来的传统综合表征指标中的2个变量，根据约束条件进行归一化处理，可以得到新的综合表征指标 C_{IN}：

$$C_{IN}=S_N/U_{SN} \tag{3}$$

式中：U_{SN}为流速；S_N为流速的标准差。

2 离散元仿真

2.1 颗粒离散元基本原理

颗粒离散法是运用阻尼力、弹性力等模拟物元间的相互作用力，再用类似于阻尼、弹性及摩擦滑移等机制模型进行计算的方法。当2个颗粒接触时，其圆心连线方向的力模拟成弹簧阻尼器模型，切线方向的力简化成滑动摩擦器和弹簧阻尼器[8]，见图1。

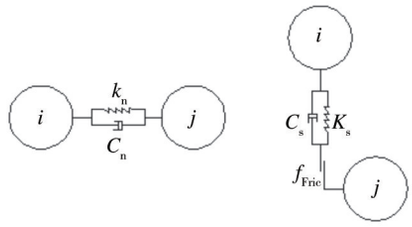

图1 颗粒间接触模型

Fig.1 Contact models between particles

当2个颗粒间的切向摩擦力大于最大静摩擦力时，使用滑动摩擦器来模拟接触力。运用迭代法计算颗粒的运动，在任一时步内，加速度和速度均被假定为常量，选择小时步进行运算，使得在每个时步内的扰动只能从一个颗粒向相邻的颗粒物元传递。因此，在任一时步中，颗粒的接触合力根据与之接触的所有颗粒物元的作用力之和即可得出。

2.2 离散元模型建立

参考国际标准及陶瓷粉的休止角大小建立装置离散元模型，设置料仓的锥角为55° [9]，见图2。由于PFC3D离散元仿真软件的局限性及仿真运算的时间较长，料仓模型以1:10的比例建立，模拟容积为0.2 L，其具体尺寸为：料仓出料口直径18 mm，进料口直径90 mm，高70 mm。为避免因料仓出料口与承载件底部间的距离过短而引起物料自由卸料受阻，设置该段距离为40 mm。同时，为避免物料向周围扩散，承载件设计为圆桶，直径为120 mm、高为35 mm。

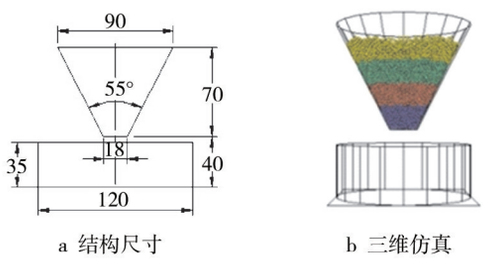

图2 仿真模型

Fig.2 Simulation model

实际测量陶瓷粉物料的粒度呈正态分布，在PFC3D软件中生成颗粒11 780个，设置最小粒径为1 mm及最大粒径为4 mm，粒径变化呈正态分布。

2.3 仿真参数

根据磨料粉体的摩擦因数变化，研究摩擦因数对流动性的影响，其他参数保持不变。这里保持料仓摩

擦因数为0.7,粉体摩擦因数分别选取0.2,0.4,0.7和1.0。其他常量确定如下。

1）刚度值。根据文献[10]选取泊松比P=0.38,得到刚度比K_n/K_s=5。根据磨料粉体特性设定颗粒的法向刚度K_{nb}和切向刚度K_{sb}分别为5,1 kN/m;选取料仓的法向和切向刚度分别为K_{nw}=5 GN/m和K_{sw}=1.0 GN/m。

2）黏性强度。法向黏性强度n_{bond}与切向黏性强度s_{bond}根据陶瓷粉的性质选取,这里考虑陶瓷粉是干颗粒,忽略含水量的影响,不计粘着力大小。

3）仿真时步(time step)。设置仿真时步时,取值较大将导致模拟失真,而取值较小时计算量又很大。根据Tsuji等[11]提出的公式选取:

$$\Delta t \leqslant \frac{2\pi}{5}\sqrt{\frac{m}{k}} \tag{4}$$

式中:m,k分别为最小单元粒子的质量和刚度。为尽可能地模拟实际的工况,提高仿真模拟结果的准确度,按照式(4)计算得时步为13 μs。

4）仿真收敛条件。仿真过程是计算颗粒碰撞力,以及颗粒的速度、位置和轨迹的动态松驰法迭代计算过程。由此,需设定仿真的收敛条件,使仿真结果接近真实。当满足式(5)时,模拟达到稳定状态[9]。

$$F_{AUF} < 0.01F_{ACF} \tag{5}$$

式中:F_{AUF},F_{ACF}分别为颗粒平均不平衡力及颗粒平均接触力。即整个系统能达到平衡状态,要求平均不平衡力降低至平均接触力的1%以内。

5）其他。与粉体流动相关性较大的参数,如粉体密度、阻尼比、接触衰减系数等的选取参考了相关研究[11—14],这里取陶瓷粉的真实体积质量为ρ_b=2600 kg/m^3,并根据磨料粉体特性选取临界阻尼比μ为0.5,接触衰减系数为0.3。

3　仿真结果分析及流动性函数建立

3.1　仿真结果分析

模拟在不同摩擦因数下磨料粉体自由卸料的过程,对仿真数据采用统一方法进行处理。由于在所有仿真中,磨料都在2 s内完成从料仓下料口漏出,故采集2 s内的20组数据。将采集点附近的仿真结果平均化处理得到的数据拟合成不同曲线,见图3。对图3曲线求导,得到流速与时间的关系见图4。对图4结果求标准差,得到稳定性与摩擦因数的关系见图5。根据图4及图5的结果,采用已创建的指标,评价不同摩擦因数下的流动性能差异,计算结果见表1。将表1的表征指标计算结果绘制成图,见图6,比较传统指标与新指标的敏感度。

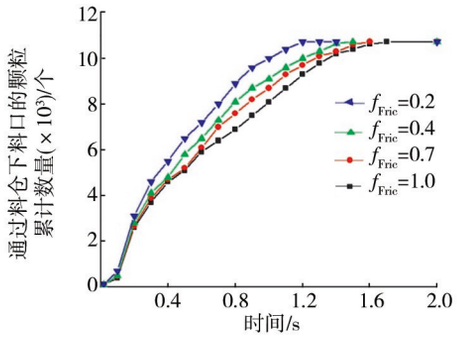

图3　不同摩擦因数磨料卸料过程

Fig.3 Free discharge process of abrasive with different friction coefficient

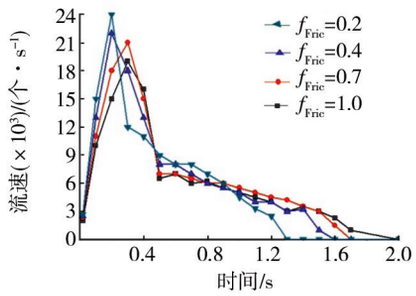

图4　不同摩擦因数下磨料卸料流速

Fig.4 Free discharge flow velocity of abrasive with different friction coefficient

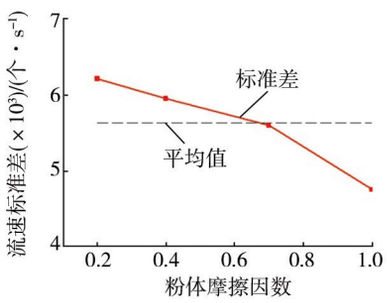

图5　流速标准差随摩擦因数的变化

Fig.5 Variation of standard deviations of flow velocity with friction coefficient

从图3可以得出,随着磨料摩擦因数的增大,磨料颗粒的卸料累计数量变化曲线弯曲程度变小。从图4可以得出,各磨料摩擦因数下的流速总体趋势减小,有明显波动。流速的波动会随摩擦因数的增加而减小,各工况下的流速相差小。从图5可以得出,随着摩擦因数的增大,其标准差呈现递减趋势,流动稳定性

表1 表征指标计算结果

Tab.1 Calculation results of evaluation indexes

摩擦因数	流速指标		稳定性指标		原始指标	综合指标
	原指标	新指标	原指标	新指标		
0.2	1.045	0.293	0.332	0.279	0.318	0.952
0.4	0.918	0.265	0.349	0.303	0.380	1.145
0.7	0.838	0.261	0.190	0.227	0.304	0.868
1.0	0.756	0.248	0.194	0.187	0.256	0.756

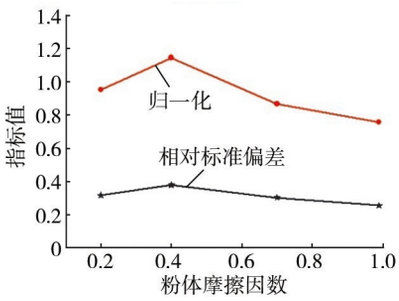

图6 表征指标检验对比

Fig.6 Examination and comparison of evaluation indexes

提高。图4及图5的结果符合随粒子间摩擦增大，粒子能量耗损加剧、动能降低、流动稳定越好的理论预测。从图6可以发现，摩擦因数为0.4时，磨料粉体的流动性最佳。

分析摩擦因数对物料流速、稳定性的综合影响，新指标的敏感度较传统指标的敏感度高，具有更好的参考意义。

3.2 流动性函数建立

用Matlab对卸料过程流速数据进行多项式回归处理，得到基态下的流动性函数为：

$$U_S=-2642.0+262\,259.0t-10^6t^2+1.7\times10^6t^3-1.3\times10^6t^4+53\,798.1t^5-80\,825.9t^6 \quad (6)$$

式中：U_S为流速（个/s）；t为时间（s）。

同上，对流速标准差随摩擦因数变化的仿真数据进行二次多项式回归处理，得到U_S与f_{Fric}的关系为：

$$U_S=6211.49+188.23f_{Fric}-1628.94f_{Fric}^2 \quad (7)$$

式中：f_{Fric}为粉体摩擦因数。

4 结语

1）基于离散单元法原理，利用PFC3D软件对料仓内砂轮磨料的自由卸料过程进行仿真，得到磨料摩擦对流动性的影响结果。随着磨料摩擦因数增大，粉体平均流速减小，而流动稳定性提高。

2）综合评价流动性的因素，建立表征指标，采用2种不同的方法处理仿真结果，得出经过归一化处理的新指标的敏感度比传统相对标准偏差指标的敏感度高。摩擦因数为0.4时，磨料粉体的流动性性能最佳。

3）根据仿真数据，分别建立了f_{Fric}=0.2的流动性函数，以及流速U_S与摩擦因数f_{Fric}的二次函数。

参考文献：

[1] 盖国胜. 粉体工程[M]. 北京：清华大学出版社，2009.
GAI Guo-sheng. Powder Engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press，2009.

[2] 孙其诚，王光谦. 颗粒流动力学及其离散模型评述[J]. 力学进展，2008，38（1）：87—100.
SUN Qi-cheng, WANG Guang-qian. Review on Granular Flow Dynamics and Its Discrete Element Method[J]. Advances in Mechanics，2008，38（1）：87—100.

[3] 张西良，马奎，王辉. 颗粒尺寸对螺旋加料机定量加料性能的影响[J]. 农业工程学报，2014，30（5）：19—27.
ZHANG Xi-liang，MA Kui，WANG Hui，et al. Effect of Particle Size on Precision Dosing of Screw Feeder[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2014，30（5）：19—27.

[4] BALEVICIUS R，KACIANAUSKAS R，MROZ Z，et al. Analysis and DEM Simulation of Granular Material Flow Patterns in Hopper Models of Different Shapes[J]. Advanced Power Technology，2011，22：226—235.

[5] 刘小君，魏庆森，张彦，等. 基于离散元法的粗糙表面摩擦过程数值模拟[J]. 合肥工业大学学报：自然科学版，2011，34（1）：23—27.
LIU Xiao-jun，WEI Qing-sen，ZHANG Yan，et al. Numerical Simulation of Frictional Process of Rough Surfaces Based on Discrete Element Method[J]. Journal of Hefei University of Technology：Natural Science，2011，34（1）：23—27.

[6] ZHAO Song，YANG Zhi-yong. Simulation Analysis on Atrium Indoor Thermal Environment Based on CDS[J]. Advances in Information Sciences and Service Sciences，2013，5（3）：817—827.

[7] 张健. 粉体定量加料器及应用研究[D]. 南京：江苏大学，2008.
ZHANG Jian. Powder Dosing Devices and Its Application[D]. Nanjing：Jiangsu University，2008.

[8] 田瑞霞，焦红光，白璟宇. 离散元法在矿物加工工程中的应用现状[J]. 选煤技术，2012（1）：72—76.
TIAN Rui-xia，JIAO Hong-guang，BAI Jing-yu. An Introduction of Distinct Element Method an Its Application in Mineral Processing Engineering[J]. Coal Preparation Technology，2012

（下转第122页）

[8] 陈曦. 基于布雷格曼迭代的稀疏正则化的图像复原算法[J]. 科学技术与工程,2014,14(9):189—193.
CHEN Xi. A Bregman Iteration Sparsity Regularization Method for Image Restoration[J]. Science Technology and Engineering,2014,14(9):189—193.

[9] ZHOU Hai-jun, WANG Chuang. Region Graph Partition Function Expansion and Approximate Free Energy Landscapes: Theory and Some Numerical Results[J]. Journal of Statistical Physics,2012,148(3):513—547.

[10] GOUSSEAU Y, MOREL J M. Are Natural Images of Bounded Variation[J]. SIAM Journal on Mathematical Analysis, 2011, 33(17):634—648.

[11] CARASSO A S. Singular Integrals, Image Smoothness, and the Recovery of Texture in Image Deblurring[J]. SIAM Journal on Applied Mathematics,2004,65(4):1749—1774.

[12] JIANG Ding-feng, HUANG Jian. Memorization Minimization by Coordinate Descent for Concave Penalized Generalized Linear Models[J]. Statistics and Computing, 2014, 24(5): 871—883.

[13] IOANNIS E L, PANAGIOTIS P. A New Class of Spectral Conjugate Gradient Methods Based on a Modified Secant Equation for Unconstrained Optimization[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics,2013,239(12):396—405.

[14] LUCA A, GISELLA F. The Total Variation of Bounded Variation Functions to Evaluate and Rank Fuzzy Quantities[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2013, 28(10): 927—956.

[15] 王静,吕科,何宁,等. 基于分裂Bregman方法的全变差图像去模糊[J]. 电子学报,2012,29(5):278—282.
WANG Jing, LYU Ke, HE Ning, et al. Total Variant Image Deblurring Based on Split Bregman Method[J]. Acta Electronica Sinict,2012,29(5):278—282.

[16] SIMCOX T, FIEZ J A. Collecting Response Times Using Amazon Mechanical Turk and Adobe Flash[J]. Behavior Research Methods,2014,48(1):95—111.

[17] MARTIN D, FOWLKES C, TAL D. A Database of Human Segmented Natural Images and Its Application to Evaluating Segmentation Algorithms and Measuring Ecological Statistics [J]. Computer Vision,2001,2(8):416—423.

(上接第70页)

(1):72—76.

[9] SANTOMASO A, LAZZARO P, CANU P. Powder Flow-ability and Density Ratios: the Impact of Granules Packing[J]. Chemical Engineering Science,2003,58(2):285—287.

[10] LANDRY H, LAGUE C, ROBERGE M. Discrete Element Modeling of Machine-manure Interactions[J]. Computers and Electronics in Agriculture. 2006(52):90—106.

[11] 杨洋,唐寿高,王居林. 颗粒离散元法中阻尼系数、刚度系数和时步的选取方法[J]. 计算机辅助工程,2007,3(16):65—68.
YANG Yang, TANG Shou-gao, WANG Ju-lin. Selection Methods on Damping Coefficient, Stiffness Coefficient and Time Step in Granular Distinct Element Method[J]. Computer Aided Engineering,2007,3(16):65—68.

[12] 段能全,王俊元,高永宏. 量杯式计量精度离散元法仿真研究[J]. 包装工程,2014,35(5):73—78.
DUAN Neng-quan, WANG Jun-yuan, GAO Yong-hong. DEM Simulation Study on the Accuracy of Measuring Cup Filling[J]. Packaging Engineering,2014,35(5):73—78.

[13] ARTONI R, ZUGLIANO A, PRIMAVERA A, et al. Simulation of Dense Granular Flows: Comparison with Experiments [J]. Chemical Engineering Science,2011,66(3):548—557.

[14] 刑纪波,俞良群,张瑞丰,等. 离散单元法的计算参数和求解方法选择[J]. 计算力学学报,2007,16(1):47—51.
XING Ji-bo, YU Liang-qun, ZHANG Rui-feng, et al. Determination of Calculating Parameters and Solution Methods of Discrete Element Method[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics,2007,16(1):47—51.

[15] 刘俊鹏. 料仓和回转机械卸料过程的离散元仿真模拟[D]. 上海:华东理工大学,2013.
LIU Jun-peng. The DEM Simulation of The Discharge Process of Silo and Rotating Machinery[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology,2013.

[16] 苏俊明,李振亮,李亚,等. 吨袋包装机料仓额定容量设计计算方法研究[J]. 包装工程,2014,35(7):95—100.
SU Jun-ming, LI Zhen-liang, LI Ya, et al. Calculation Methods for Rated Capacity Design of Hopper in Ton Bag Packing Machine[J]. Packaging Engineering,2014,35(7):95—100.