

自动卸煤车卸料时间的离散元分析

严颖¹, 李勇俊², 季顺迎²

(1. 大连交通大学 土木与安全工程学院, 辽宁 大连 116028; 2. 大连理工大学 工程力学系, 辽宁 大连 116023)*

摘要: 为提高自动卸煤车的卸煤效率, 需要对煤粉在车内的流动特性及相应的卸煤时间进行深入研究. 采用离散元方法对自动卸煤车的卸煤过程进行了数值模拟, 确定了不同含水量下的卸煤时间. 为确定离散元模型在煤粉流动分析中的有效性, 采用煤粉在筒仓内的流动试验进行了模型检验和计算参数的确定. 在此基础上对自动卸煤车内煤粉的流动过程进行了离散元分析, 讨论了含水量对卸煤时间的影响. 计算结果表明: 当含水量相对较低时, 受颗粒间液桥力的影响, 卸煤时间随含水量的增加而增加; 当含水量超过临界值后, 颗粒间液桥断裂, 颗粒间水分润滑减小了摩擦力, 卸煤时间随含水量的增加而减小.

关键词: 离散元方法; 卸煤时间; 筒仓试验; 含水量; 自动卸煤车

文献标识码: A

DOI:10.13291/j.cnki.djdxac.2016.03.019

0 引言

在煤粉运输过程中, 煤粉的流动特性直接影响到相关自动卸煤车的结构设计. 煤粉流动性能的影响因素主要包括粒径、颗粒形态、含水量等, 并可通过 Hausner 指数^[1]、休止角、流动函数 FF^[2] 或 Carr 指数^[3] 和标准质量流率^[4] 等参数进行表征. 煤粉作为一种典型的散体材料, 其流动特性可通过离散元方法进行数值分析, 同时综合考虑颗粒形态、粒径和含水量等因素的影响以合理地确定其在卸煤车内的流动规律和卸煤时间.

煤粉颗粒在自然条件下具有显著的非规则形态. 但目前在离散元模型中更多地采用二维圆盘单元或三维球体单元以简化计算、提高计算效率. 值得注意的是, 在采用球形单元模拟非规则颗粒形态的流动特性时, 需合理引入摩擦系数以体现非规则颗粒单元之间的咬合效应, 从而提高计算结果的可靠性^[5-7]. 颗粒形态的差异可导致其表现为滑动或滚动特征, 并可根据颗粒的表面规则度设定相应的滑动和滚动摩擦系数^[6-7]. 此外, 煤粉粒径在 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ m 量级时, 对其进行真实尺度的离散元模拟在目前的计算条件下是不可行的. 这时, 在考虑

尺寸效应的前提下, 通过扩大单元粒径的途径以实现工程尺度上的离散元分析^[8]. 这也是当前离散元方法在处理工程应用问题时的一个有效方法.

含水量对煤粉流动特性的影响主要体现为颗粒间的液桥吸附力和摩擦力^[9-10]. 对于含水颗粒材料, 颗粒表面会覆盖一层水薄膜, 并在颗粒靠近时, 薄膜逐渐融合在一起形成液桥力. 此外, 颗粒表面的水薄膜在颗粒之间又会起到一定的润滑作用, 从而引起颗粒表面摩擦系数的减小. 因此, 在对含水煤粉的离散元模拟中, 需要同时考虑含水量对液桥力和摩擦系数的影响.

本文采用离散元方法对自动卸煤车的卸煤过程进行数值分析, 并通过筒仓流动试验进行参数确定和模型检验. 对不同含水量下的卸煤时间进行确定, 为卸煤车的结构设计和卸煤时的行车速度提供参考依据.

1 自动卸煤车中煤粉流动的离散元模型

1.1 煤粉颗粒间的接触模型

在颗粒相互作用过程中, 考虑单元间相对速

* 收稿日期: 2015-09-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11172063, U1234209, 11572067)

作者简介: 严颖(1973-), 女, 副教授, 博士, 主要从事离散元方法及其在铁路工程中的应用研究

E-mail: yyan@dljutu.edu.cn.

度和相对位置引起的非线性粘弹性作用力,并采用 Mohr-Coulomb 摩擦定律确定单元间的剪切力,其接触力模型如图 1 所示,图中 M_A 和 M_B 分别为颗粒单元 A、B 的质量, K_n 和 K_s 分别为法向和切向刚度系数, C_n 和 C_s 分别为法向和切向阻尼系数, μ 为滑动摩擦系数。

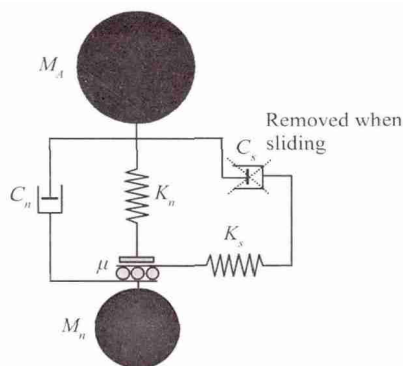


图1 颗粒单元间的接触模型

在颗粒接触的法线方向,颗粒单元间的法向力包括 Hertz 非线性弹性力和非线性粘滞力。弹性力模拟颗粒间相互接触时的排斥力,而非线性粘滞力模拟颗粒接触过程中因相对速度导致的能量耗散,可表述为:

$$F_n = K_n x_n^{3/2} + \frac{3}{2} A K_n x_n^{1/2} \dot{x}_n \quad (1)$$

式中, x_n 和 $\dot{x}_n$ 分别为颗粒的法向重叠量和相应速率; A 为颗粒材料的粘滞性参数。

在颗粒接触的切线方向,基于 Mindlin 理论和 Mohr-Coulomb 摩擦定律,并忽略切向粘滞力影响,则切向接触力写做:

$$F_s^* = k_s x_n^{1/2} x_s \quad (2)$$

$$F_s = \min(F_s^*, \text{sign}(F_s^*) \mu F_n) \quad (3)$$

式中, x_s 为切向变形。法向刚度 K_n 和切向刚度 K_s 分别为:

$$K_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \quad (4)$$

$$K_s = 8 G^* \sqrt{R^*} \quad (5)$$

其中, $E^* = \frac{E}{2(1-v^2)}$, $G^* = \frac{G}{2(2-v)}$, $R^* = \frac{R_A R_B}{R_A + R_B}$ 。 E 、 v 和 G 分别为颗粒材料的弹性模量、泊松比和剪切模量, R_A 和 R_B 为两个接触颗粒单元的半径。

非线性离散元模拟中,计算时间步长一般通过由颗粒表面瑞雷波的传播周期来确定。这里首先定义临界时间步长为^[1]:

$$\Delta t_{\text{crit}} = \frac{\pi R_{\min}}{0.163v + 0.8766} \sqrt{\frac{\rho}{G}} \quad (6)$$

在离散元计算时,实际时间步长要小于 $t_{\max}$,一般写作:

$$\Delta t = \alpha \Delta t_{\text{crit}} \quad (7)$$

式中, α 为经验系数,本文取 $\alpha = 0.2$ 。

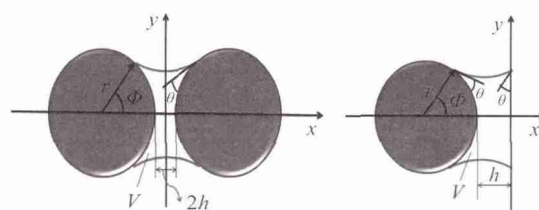
煤粉颗粒间及其与边界之间的滚动摩擦可在一定程度上反映单元间咬合和互锁效应。这里滚动摩擦按下式计算^[12-13]:

$$M_r = \min(K_r \theta + C_r \dot{\theta}, \eta F_n) \quad (8)$$

式中, M_r 为颗粒间的滚动摩擦; θ 和 $\dot{\theta}$ 分别为接触颗粒间的相对转角和相对角速度; K_r 和 C_r 分别为滚动摩擦刚度系数和粘性系数,这里取 $K_r = K_s \bar{R}^2$, 其中 $\bar{R}$ 为两个接触颗粒的平均半径; η 为滚动摩擦系数,这里取 $\eta = \zeta B$, 其中 ζ 为无量纲滚动摩擦系数, B 为接触面积的直径,由两接触颗粒的粒径及相对位置确定。本文计算忽略粘滞力引起的滚动摩擦,即取 $C_r = 0.0$ 。

1.2 含水煤粉颗粒间的液桥力模型

当颗粒表面存在水分时,颗粒与颗粒、颗粒与边界之间会产生液桥力。通常认为液桥力与其形状、接触角以及填充角有关。颗粒与颗粒、颗粒与边界之间的液桥力接触模型如图 2(a)、(b) 所示,其中 V 为液桥体积, φ 为接触角, θ 为湿润角, $2h$ 与 h 分别为颗粒之间、颗粒与边界之间的距离, d , r 为颗粒半径。



(a) 颗粒与颗粒液桥力模型 (b) 颗粒与边界液桥力模型

图2 颗粒接触的液桥力模型

当含水量 $W = 0$ 时,即干颗粒间不存在液桥力。当 $W > 0$ 时,存在三种情况。当 $d \leq 0$ 时,即颗粒发生弹性接触时,液桥力相对于弹性力较小,可忽略;当 $0 < d < d_{\text{rup}}$ 时,则需要考虑液桥力的影响,这里 d_{rup} 为颗粒间液桥的断裂距离;当 $d > d_{\text{rup}}$ 时,液桥发生断裂,液桥力也随之消失。根据 Mikami et al. (1998)、Chen et al. (2011) 对液桥力 F_c 的计算模型^[14],经简化得到:

$$F_c = \pi(R_A^2 + R_B^2) \hat{F}_c \quad (9)$$

$$d_{rup} = d_{ab} \cdot \hat{d}_{rup} \quad (10)$$

式中, $\hat{F}_c$ 为无量纲液桥力, $\hat{d}_{rup}$ 为无量纲断裂距离, d_{ab} 为两颗粒半径之和. 这里取

$$\hat{F}_c = 10gW^{1/3} \quad (11)$$

$$\hat{d}_{rup} = 0.1W^{1/3} \quad (12)$$

式中, $\hat{F}_c$ 和 $\hat{d}_{rup}$ 由 Mikami et al. (1998) 的无量纲液桥力模型简化得到.

除颗粒间的液桥力外, 颗粒表面的光滑度也会在含水条件下发生很大的变化. 随着含水量 W 的增大, 颗粒的滑动和滚动摩擦系数 μ_s, μ_r 一般均随之减小. 本文假设滑动和滚动摩擦系数随含水量呈负指数形式衰减, 即 $\mu_s = \mu_s^0 e^{-3W}$ 和 $\mu_r = \mu_r^0 e^{-3W}$, 这里 μ_s^0 和 μ_r^0 分别为干煤粉的滑动和滚动摩擦系数. 该负指数形式的合理性将通过颗粒材料在不同含水量的筒仓流动试验进行验证.

在粉煤颗粒与车体壁面的接触计算中, 将壁面设为刚性平面体, 不考虑车体壁面的变形和运动, 此时接触力计算中的法向和切向位移、相对速度均由颗粒与壁面的相对位置和相对速度确定, 法向刚度、切向刚度和滚动摩擦刚度均为颗粒间接触时的 2 倍.

2 煤粉流动的筒仓试验及离散元数值模拟

2.1 煤粉流动的筒仓试验

为确定煤粉流动的离散元计算参数, 这里设计筒仓卸煤实验进行煤粉流动测试, 其装置如图 3 所示. 试验中选取粒径在 4 ~ 10 mm 间的煤粉进行卸料时间的测试, 含水量 W 在 0% ~ 20% 之间. 每组试验的煤粉质量均取为 6 kg. 试验中要尽量避免水份搅拌不均、存在大量细小粉末等试验误差. 在不同含水量下进行 3 次有效试验, 测量每次煤粉流出筒仓的时间, 然后取其平均值, 试验结果如图 4 所示.

从测试结果可以看出, 煤粉由筒仓流出的时间存在一个临界含水量 $W_c = 6\%$. 当含水量 $W < W_c$ 时, 卸煤时间 T 随着含水量的增加而增加, 即含水量越高煤粉的流动性越弱; 当 $W > W_c$ 时, 卸煤时间 T 又会随含水量的增加而减小, 即含水量越高煤粉的流动性越强. 以上结果表明, 在低含水量下 ($W < W_c$), 煤粉中的水份会增强颗粒间的液

桥吸附力, 并随含水量的增加而增强, 从而导致卸煤时间随含水量的增加而增加; 而在高含水量下 ($W > W_c$), 煤粉中较充足的水份使颗粒间的摩擦系数不断降低, 且煤粉材料也因趋向饱和而使颗粒间的液桥力不断消失, 从而增强了煤粉的流动性能, 使卸煤时间随含水量的增加而降低.

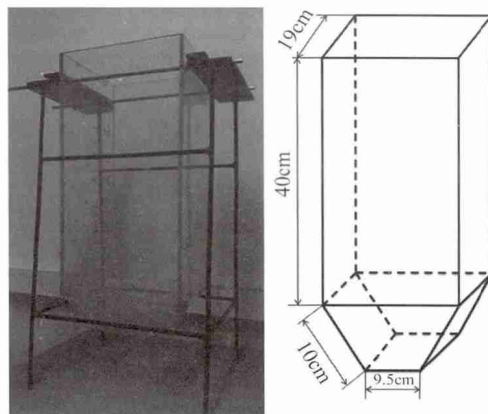


图3 煤粉流动测试的筒仓模型

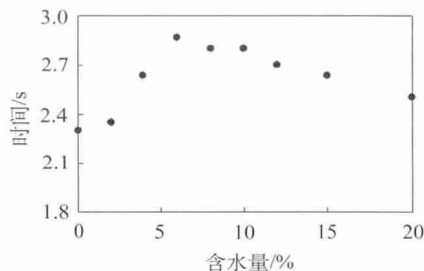


图4 不同含水量下煤粉在筒仓内卸煤时间

2.2 煤粉流动筒仓试验的离散元数值模拟

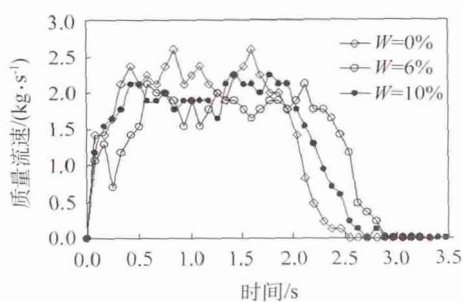
采用离散元方法模拟筒仓内的煤粉流动过程, 其中筒仓结构参数与图 3 一致. 煤粉粒径与试验相同, 在 4 ~ 10 mm 之间随机分布, 煤粉颗粒为 15 120 个. 由于车体壁面光滑, 其与颗粒的摩擦系数为颗粒间的 0.7 倍. 相关计算参数列于表 1 中.

表1 筒仓内卸煤过程离散元模拟的主要计算参数

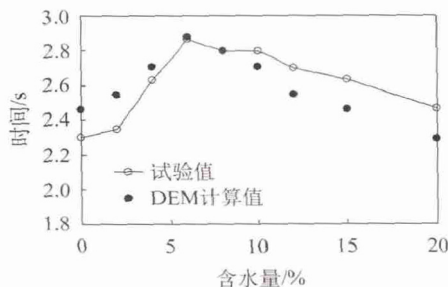
计算参数	数值
煤粉粒径范围/mm	4 ~ 10
干颗粒滑动摩擦系数	1.0
煤粉弹性模量/MPa	10
干颗粒滚动摩擦系数	0.7
粘滞系数	0.1
煤粉颗粒密度/(kg · m ⁻³)	1 350
煤粉质量/kg	6.0
含水量/%	0 ~ 20

在对筒仓卸煤过程的离散元计算中,选取9组含水量分别为0%、2%、4%、6%、8%、10%、12%、15%和20%,由此得到的不同含水量下的计算结果如图5所示。图5(a)给出了含水量分别为0%、6%和10%的煤粉质量流速 Q 。这里质量流速 Q 是指单位时间内煤粉流过漏斗口的质量。质量流速 Q 越大,则煤粉的流动性越好。由图5(a)可知,质量流速 Q 随时间 t 的变化呈现初始流动、稳定流动和后期流动三个阶段。由于稳定流动阶段的质量流速大,持续时间长,其决定了整体的卸煤时间 T 。从图5(a)还可以看出,在稳定流动阶段,含水量 $W=6\%$ 的质量流速最小。这是由于在该含水量下颗粒间的液桥吸附力与摩擦力对颗粒的作用较大。此外,从图5(a)中还可看出,不同含水量下的质量流速均表现出很强的波动性。这主要是由于筒仓与颗粒间动态耦合中发生的滑滞效应,以及煤粉颗粒在出口处的堆积-释放-再堆积的脉动性质^[14-15]。

采用离散元方法模拟的不同含水量下的卸煤时间如图5(b)所示,图中同时也给出了筒仓的试验数据。可以发现,数值结果与试验值在不同含水量下具有相近的变化规律。在低含水量下,卸煤时间 T 均随着含水量 W 的增加而增加,并在临界含水量 $W_c=6\%$ 时达到最大,然后再随含水量的增加而减少。



(a) 不同含水量下的质量流速



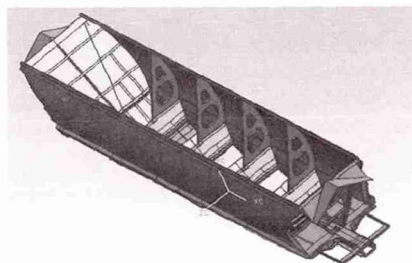
(b) DEM模拟值与试验值对比

图5 不同含水量下煤粉流动的DEM模拟及与试验结果对比

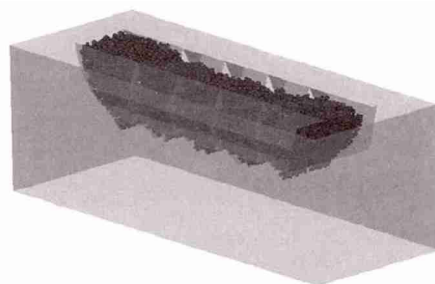
3 自动卸煤车卸煤过程的离散元模拟

3.1 自动卸煤过程的离散元模型

自动卸煤车的结构模型如图6(a)所示,其底部共开有4排底门,车体内有8个挡板。在卸煤时4排底门以6.67 s间隔依次打开。在卸煤过程的离散元模拟中,对车体模型在不影响煤粉流动的条件下进行了简化,利用刚性三角形单元构建车体,如图6(b)所示。



(a) 卸煤车整车结构模型



(b) 卸煤车DEM计算模型

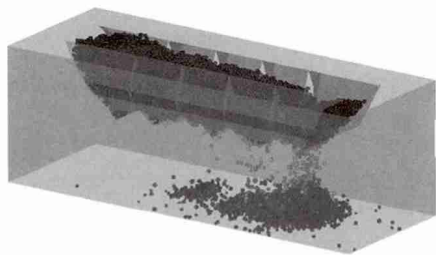
图6 卸煤车的结构模型

3.2 卸煤过程的离散元模拟

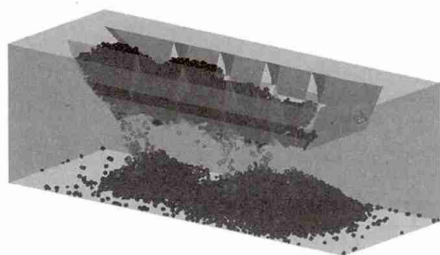
在卸煤车煤粉卸料过程的离散元模拟中,采用筒仓试验确定的计算参数,同时考虑当前计算机的计算性能,选取煤粉粒径在 $[20, 200]$ mm范围内随机分布。卸煤车内的煤粉质量为 42×10^3 kg,颗粒单元为16 368个。含水量设定在 $[0\%, 20\%]$ 之间。

图7为含水量 $W=4\%$ 的煤粉卸料过程在不同时刻的离散元模拟结果,其卸煤时间 $T=49.6$ s。图8为该含水量下煤粉的质量流速时程曲线。不同含水量下卸煤时间 T 的离散元计算结果如图9所示。可以发现,卸煤时间 T 随含水量 W 的变化非常显著,并类似于筒仓内煤粉流动时间的变化规律,即在整体上随含水量 W 呈现先增大后减小的趋势,并存在一个临界含水量 $W_c=6\%$ 。在含水量 $W<6\%$ 时,卸煤时间 T 随着含水量的提高而增

加;当 $6\% < W$ 时,卸煤时间 T 则随含水量的增加而降低。以上计算结果表明,含水量直接影响煤粉颗粒的流动特性。



(a) $t = 17.8 \text{ s}$



(b) $t = 35.6 \text{ s}$

图7 卸煤车内煤粉颗粒流动过程的离散元模拟

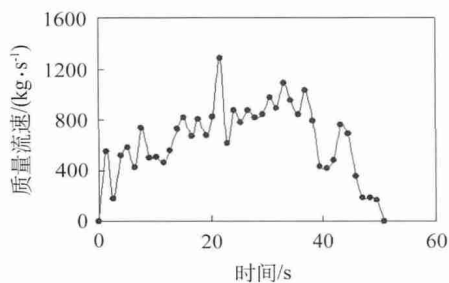


图8 含水量为4%时煤粉的质量流速

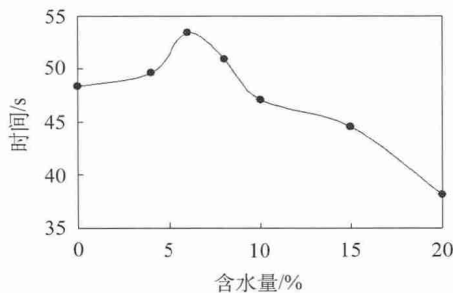


图9 离散元模拟的不同含水量下的卸煤时间

4 结论

(1) 采用离散元方法对煤粉在卸煤车内的流动过程进行了数值模拟,确定了不同含水量下的卸煤时间。本文将液桥力及其断裂距离、摩擦力设

定为含水量的函数,并通过煤粉的筒仓试验进行了离散元模型的验证和计算参数的确定;

(2) 对自动卸煤车在四个底门依次打开的条件下对卸煤过程进行了离散元模拟,得到了不同含水量下的卸煤时间。煤粉颗粒存在一个临界含水量。当含水量低于该临界值时,颗粒材料的流动特性随含水量的增加而降低;当含水量高于该临界值时,其流动特性则会随含水量的增加而增强。

参考文献:

- [1] CARNAVAS P C, PAGE N W. Particle shape factors and their relationship to flow and packing of bulk materials [J]. //National Conference Publication-Institution of Engineers Australia NCP. Institution of Engineers, Australia, 1994: 241-246.
- [2] 谢洪勇,刘志军. 粉体力学与工程 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 34-44.
- [3] 张鹏. 卡尔指数法在评价粉煤粉体特性中的应用 [J]. 中国粉体技术, 2000, 6(5): 33-36.
- [4] THALBERG K, LINDHOLM D, AXELSSON A. Comparison of different flowability tests for powders for inhalation [J]. Powder technology, 2004, 146(3): 206-213.
- [5] MOYSEY P A, RAMA RAO N V, BAIRD M H I. Dynamic coefficient of friction and granular drag force in dense particle flows: Experiments and DEM simulations [J]. Powder Technology, 2013, 248(11): 54-67.
- [6] 杜欣,曾亚武,高睿,等. 用离散元方法研究颗粒外形对摩擦机理的影响 [J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(2): 252-257.
- [7] 孙珊珊,苏勇,季顺迎. 颗粒滚动-滑动转换机制及摩擦系数的试验研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30(S1): 110-115.
- [8] 花俊杰,周伟,常晓林,等. 堆石体应力变形的尺寸效应研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 328-335.
- [9] MIKAMI T, KAMIYA H, HORIO M. Numerical simulation of cohesive powder behavior in a fluidized bed [J]. Chemical Engineering Science, 1998, 53(10): 1927-1940.
- [10] CHEN YOU CHUAN, ZHAO YONG ZHI, GAO HONG LI, et al. Liquid bridge force between two unequal-sized spheres or a sphere and a plane [J]. Particuology, 2011, 9(4): 374-380.
- [11] KREMMER M, FAVIER J F. A method for representing boundaries in discrete element modelling-part II-Kinematics [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001, 51: 1423-1436.
- [12] JI S Y, HANES D M, SHEN H H. Comparisons of physi-

- cal experiment and discrete element simulations of sheared granular materials in an annular shear cell [1]. Mechanics of Materials, 2009, 41(6): 764–776.
- [3] JIANG M J, YU H S, HARRIS D. A novel discrete model for granular material incorporating rolling resistance [J]. Computers and Geotechnics, 2005, 32: 340–357.
- [4] GRUDZIEN K, CHANIECKI Z, ROMANOWSKI A, et al. ECT Image Analysis Methods for Shear Zone Measurements during Silo Discharging Process [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2012, 20(2): 337–345.
- [5] WILDE K, TEJCHMAN J, RUCKA M, et al. Experimental and theoretical investigations of silo music [J]. Powder Technology, 2010, 198(1): 38–48.

Discrete Element Analysis of Discharging Time of Coal Hopper Wagon

YAN Ying¹, LI Yongjun², JI Shunying²

(1. School of Civil and Safety Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China; 2. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: To improve the discharging efficiency of coal hopper wagon, the flow characteristics of coal powders in wagon and the corresponding discharging time need to be investigated comprehensively. The discrete element method (DEM) is adopted to analyze the coal discharging characteristics and determine the corresponding discharging time of the automatic coal discharging hopper wagon under different water contents. Silo experiment is designed to validate the computational parameters in the DEM simulations and the coal discharging process in the coal hopper wagon is analyzed under different water contents, and the influence of water content on the discharging time is discussed. The results show that under low water contents, the discharging time increases with increasing water content because of the inter-particle liquid bridge force. If the water content is beyond a critical value, the discharging time decreases with the increase of water content. With the DEM analysis of coal discharging in the coal hopper wagon, the influence of water content can be revealed on flow characteristics of coal material.

Keywords: discrete element method; coal hopper wagon; hopper flow test; water content; coal hopper wagon