

DOI: 10.7511/jslx201605018

煤仓内煤散料流动状态与力学行为影响因素

王学文^{*1,2}, QIN Yi², TIAN Yan-kang², YANG Xin-yu², 杨兆建¹

(1. 太原理工大学 机械工程学院 煤矿综采装备山西省重点实验室, 太原 030024;
2. 思克莱德大学 设计制造与工程管理部, 格拉斯哥 G1 1XQ, 英国)

摘要: 针对煤仓内煤散料流动问题及其力学行为, 采用三维颗粒流模拟程序 PFC^{3D} 建立了某型号煤仓与某种煤散料的离散元模型, 简述了其力学模型与求解步骤, 模拟分析了煤仓内煤散料卸料流动状态。通过分析水平向侧压力、颗粒速度场和接触力场, 重点讨论了煤仓下部锥体内壁面摩擦系数、锥仓倾角和卸料口径等对煤散料颗粒流动状态和力学行为的影响。结果显示, 深仓卸料流动为整体流动与中心流动混合状态, 煤仓内壁摩擦系数、锥体倾角和卸料孔开口半径均对煤散料流动和水平侧压力有较大影响。

关键词: 煤仓; 散料; 颗粒; 流动; 侧压力; 离散元

中图分类号: TU249.3; O34

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2016)05-0773-06

1 引言

筒仓在使用过程中, 散料流动与堵仓问题非常常见^[1-4], 严重影响生产率的提高。针对筒仓散料流动问题进行的散料与仓体力学关系研究, Moreau等^[5]是早期的研究者。19世纪末, 筒仓与散料的力学行为研究出现了突破性的进展, 先后涌现了诸如 Janssen^[6]和 Airy^[7]等学者提出的各自理论, 尤其是 Janssen 理论。Janssen^[6]根据 2 个基本假设导出了著名的圆筒仓壁静压力计算公式, 即 Janssen 公式。由于其对颗粒系统静应力简单而深刻的概括, 对于今天的颗粒系统物理研究仍有着重要意义, 并得到广泛引用和应用, 同时, 学者们也围绕侧压力和侧压力系数提出了许多研究成果^[8,9]。

在贮存散料状态下, 筒仓及储料的受力行为与破坏准则均比较复杂, 过去几十年, 国内外学者围绕散料对筒仓的接触^[10]、力学行为^[9]和稳定性影响^[11,12]等进行了大量研究。特别是随着有限元和离散元方法的逐步发展成熟^[13,14], 数值模拟方法对筒仓研究作出了很大贡献。

综观国内外相关文献, 有关散料与筒仓的研究主要集中于散料在仓内的压力分布和侧压力系数

等领域, 并提出了有意义的理论成果。对于散料在筒仓内的流动状态及其力学行为近些年也常有关注^[15]。但在筒仓实际使用中, 许多工程基础问题一直得不到有效解决, 如堵仓和溃料事故的经常发生, 说明筒仓的受力不是很稳定, 会突然发生大的改变, 一般认为这种改变是由装料和卸料过程的流动引起, 并与筒仓下部锥体的形式和散料的物理特性有关。

本文的研究重点主要集中于基于 PFC^{3D} 技术, 以某煤仓和某煤散料为例, 使用离散元方法讨论煤仓内煤散料流动状态, 并特别对影响流动状态和力学行为的煤仓下部锥体内壁面摩擦系数、锥仓倾角和卸料口径等影响因素进行模拟和分析, 以便为煤仓结构设计、防堵疏堵以及运行维护等提供工程应用指导与理论支持。

2 计算模型

2.1 求解步骤

煤仓内散料颗粒移动时是相互独立的, 颗粒通过接触点相互传递力的作用, 其离散特点使得它们在煤仓中填充和卸料时表现出非常复杂的特性, 因此至今尚未建立满意的本构模型, 一般以离散元为基础, 考虑散料颗粒间的力和力矩不等于零, 根据牛顿第二定律进行计算。

PFC^{3D} 使用球体单元模拟煤仓内颗粒的运动和受力。由平面内的平动和转动运动方程来确定各个时刻煤散料颗粒的位置和速度, 并采用大量的

收稿日期: 2015-06-04; 修改稿收到日期: 2015-09-24.

基金项目: 国家自然科学基金(51105266); 国家留学基金(201308140087); 山西省高等学校创新人才支持计划(2014)资助项目.

作者简介: 王学文*(1979-), 男, 博士, 副教授
(E-mail: wxuew@163.com).

颗粒单元模型来模拟煤仓内散料运动状态。计算时作如下假设,煤散料颗粒单元为刚性球体且接触为点接触(煤仓内颗粒的自然运动和接触主要发生在接触表面);相对于其运动,煤散料颗粒自身应变忽略。主要求解步骤如图 1 所示。

2.2 离散元模型子程序设置

首先确定煤散料颗粒半径、空隙率和级配等颗粒参数,分别为以下子程序在仿真过程中按顺序调用。

(1) 煤仓模型子程序 MODEL_SILO

主要包括 create_wall, create_top_wall, create_hopper_gate 和 create_hopper 四个子函数,分别用以建立侧墙、仓顶、仓底漏斗和卸料孔挡墙模型,四部分构成完整煤仓模型,其几何参数在参数子程序中调用,需正确设置监测点和煤仓侧壁相关参数。下部锥形漏斗按类似方法生成,煤仓模型如图 2 所示。

(2) 煤散料颗粒模型子程序 MODEL_GRANULAR

包括三个主要函数,煤散料颗粒过滤函数 filter_for_ball_creation,空隙率函数 get_porosity 和煤散料颗粒生成函数 create_balls。煤散料颗粒生成函数调用过滤函数和空隙率函数,使生成的颗粒分别满足在指定的空间域内,并满足目标设定的空隙率。

(3) 参数子程序 VARIABLES_SILO

包含四个函数,wall_variables 设定墙的几何参数、设定监测墙的数量和墙的各向刚度及摩擦系数等;hopper_variables 设定煤仓卸料口的位置和大小等参数;top_variables 考虑煤仓顶部锥堆角;balls_variables 定义煤颗粒单元集合的目标孔隙率、煤颗粒最小半径与最大半径、最大半径与最小半径的比值、煤颗粒密度及刚度系数等。

(4) 运行求解子程序 SOLVE_MODEL

编制图形输出函数 plot_model,检测模型运行过程中侧压力曲线、不平衡力矩曲线和接触应力等的变化情况。给煤颗粒赋予重力加速度,为快速达到平衡状态,先不给煤仓墙体和仓内颗粒单元以及颗粒单元间的接触指定摩擦系数,缩短循环步数。循环达到平衡后,赋予煤仓墙体摩擦系数,继续循环,并按需要控制卸料流动状态的循环步数。卸料流动循环中,调用 delete_balls 函数,删除已经从卸料口掉落的煤颗粒,以加快程序的运行速度。

(5) 结果提取子程序 READ_RESULTS

流动状态模拟循环过程中,随时对卸料开关进行控制,以获取卸料中间状态的模型信息,并将图形和循环历史等信息存入结果文件 Response.sav 进行处理。

2.3 煤仓与煤散料颗粒模型

本文模型根据某企业使用的煤仓,按一定缩尺比例在 PFC^{3D}中建模,相似比在颗粒重力密度中给予考虑,原始几何参数列入表 1,煤仓内某散料颗粒主要物理力学参数列入表 2,根据上述子程序设置与参数设置进行建模,得到 PFC^{3D}煤仓结构与煤散料颗粒模型,如图 3 所示。

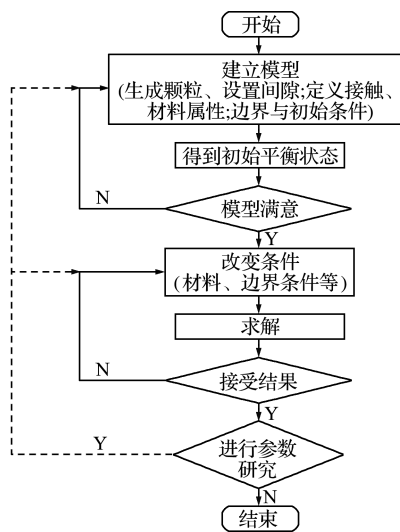


图 1 求解步骤
Fig. 1 Solving steps

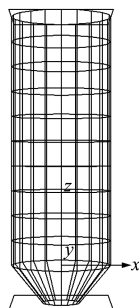


图 2 PFC^{3D}模型煤仓墙体
Fig. 2 Wall model of the silo in PFC^{3D}

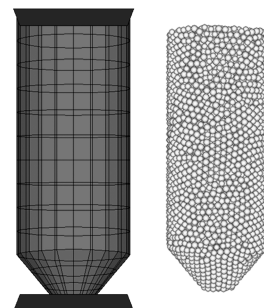


图 3 PFC^{3D}煤仓结构与颗粒模型
Fig. 3 Model of the silo and the granular materials in PFC^{3D}

表1 煤仓原始物理参数

Tab.1 Structural parameters of the silo

直筒高/m	筒径/m	锥体卸料口径/m	锥高/m
30	12	3.6	5

表2 煤散料颗粒与煤仓物理力学参数

Tab.2 Mechanical parameters of the granular materials and the silo

侧壁法向刚度/($N \cdot m^{-1}$)	1.0×10^8
侧壁切向刚度/($N \cdot m^{-1}$)	0.9×10^8
颗粒法向刚度/($N \cdot m^{-1}$)	0.5×10^8
颗粒切向刚度/($N \cdot m^{-1}$)	0.3×10^8
颗粒密度/($kg \cdot m^{-3}$)	1350
颗粒间摩擦系数	0.5
颗粒与侧壁摩擦系数	0.4
颗粒半径/m	0.025~0.050

3 卸料流态分析

深仓内卸料流态大致可分为三种,(1)整体流动;(2)中心流动;(3)起拱。

计算结果显示,装料时处于同一水平段内的各层颗粒,卸料开始后,颗粒流动速度大致相同,基本保持在同一水平面上。此时,仓内煤散料颗粒的上表面整体下降,表面仍保持平整的水平面。

经过一定时步数的循环,仓内颗粒的卸料方式逐渐从单一的整体流动演变为整体流动与中心流动混合的卸料方式。煤散料颗粒的整体流动主要是由煤仓上部散料贡献,煤散料颗粒在煤仓直筒部分水平面内的流速大致相等,两种卸料流动方式之间并不存在明显的分界,在锥仓内部,两种流态相互叠加,形成一种特殊流态。

在卸料中间状态,中心流动主要由底部锥体煤散料流动引起,或称之为管状流态。即在卸料口上方,形成一管状卸料通道,卸料通道内煤散料流动速度较大,离卸料通道较远颗粒流动速度较小。与煤仓上部颗粒的流动相比,下部锥体内煤散料流态与受力都比较复杂,处在同一水平线上的煤散料在各处的流动速度是不同的,呈现管状卸料流态,接近卸料通道处的煤散料流动最快,而贴近仓壁面的煤散料流速较慢。这种速度的不同造成了力学梯度,使得仓中煤散料在流动时受到剪切混合力作用,在底部锥体附近以及锥体中的物料分层示踪所显示的煤散料流态不再和整体流动相同,分布形状呈非水平状态。

煤仓底部锥体自上而下横截面逐渐缩小,而横

截面收缩率逐渐增大,卸料过程中,煤散料在自重作用下流出料斗。流动过程中,煤散料颗粒位置每下降一段微小高度都要重新进行排列,原同一水平面的煤散料呈不均匀下降以适应截面收缩率的变化,越接近出口截面收缩率越大,煤散料颗粒间挤压错动也越大,颗粒内外摩擦力急剧增大,颗粒原有层面破坏到一定程度时,散料层呈现出锅底形甚至漏斗形特征。

由于锥体截面积逐渐收缩,煤散料颗粒的阻力随横截面积变小而变大,在卸料口处达到最大。煤仓上部散料流动受阻作用较小,下部流动受到阻止而上部流动持续,因而对下面的颗粒产生压实作用,使流动更加困难。

图4为卸料状态下煤散料颗粒速度场分布,瞬间速度场分布可反映在此循环时步前后煤散料颗粒的流动趋势。各颗粒速度向量的方向表示单个颗粒的流动趋向,速度线的长度及煤散料颗粒的速度场疏密程度反映煤散料流动的剧烈程度。从图4可以看出,卸料状态下,煤仓内部各区域煤散料速度场分布疏密程度基本一致,这也从速度场角度说明该煤散料在该型煤仓中以整体流动为主。在靠近卸料口附近,速度场较密,表明煤散料颗粒流动更快,符合管状流动颗粒速度分布。

4 动态力学行为影响因素分析

4.1 摩擦系数

在本文建立的模型基础上,保持煤仓物理几何参数与力学参数相同,改变煤仓内壁摩擦系数,比较煤散料颗粒与内壁摩擦系数分别为0.1,0.4和0.8时的静动态力学行为。

图5为不同摩擦系数下煤仓上部圆柱面在满仓静态时的竖向摩擦力,可知随着摩擦系数的增加,煤仓上部圆柱面各埋深处的竖向摩擦力呈增加趋势,仓壁摩擦系数对竖向摩擦力影响较大。

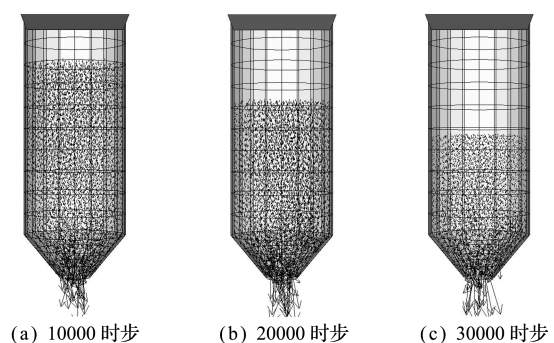


图4 卸料过程煤颗粒速度场(不同循环时步)

Fig.4 Velocity field of the granular materials in different time steps

图 6 为在不同摩擦系数下卸料过程中煤仓内部煤散料颗粒系统的接触力场。可知进行同样的卸料循环后,摩擦系数小的仓内所剩煤散料明显较少。摩擦系数 $\mu=0.1$ 的煤仓内接触力场呈现上疏下密分布规律,和颗粒流动有紧密关系;摩擦系数 $\mu=0.8$ 的煤仓内部接触力场较强,几乎无流动。

4.2 锥仓倾角

根据工程煤仓中实际使用锥底倾角,选用 $50^\circ, 60^\circ$ 和 70° 倾角进行分析。

图 7 为煤仓下部不同倾角锥体监测墙水平向侧压力随卸料循环变化曲线,可知在满仓静止状态

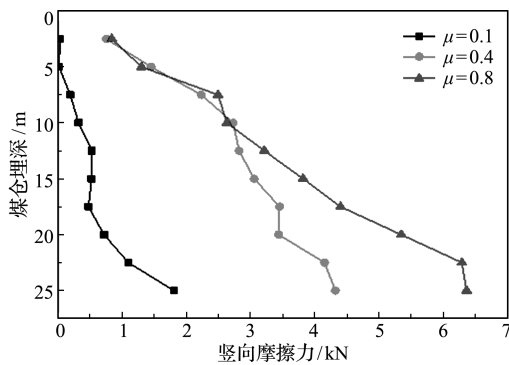


图 5 煤仓圆柱面摩擦力(不同摩擦系数)

Fig. 5 Friction force of the silo in different friction coefficients

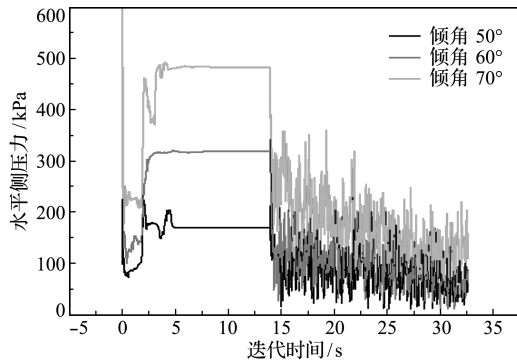


图 7 锥体水平侧压力曲线(不同倾角)

Fig. 7 Changing curve of the lateral pressure of the hopper in different angles of inclination

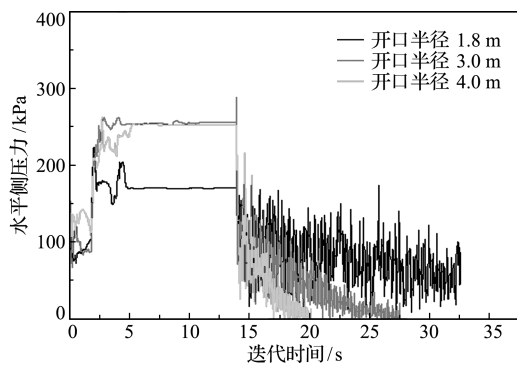


图 9 锥体水平侧压力曲线(不同卸料口径)

Fig. 9 Changing curve of the lateral pressure of the hopper in different discharging pore size

时,倾角越大,侧压力值越大。进入卸料阶段,倾角越大,侧压力下降段越明显,卸料过程侧压力下降速度越快。

图 8 表示循环 10000 步时,不同锥体倾角下卸料过程中煤仓内部颗粒系统速度场分布。可知倾角越大,卸料孔附近速度场越密集,倾角 70° 时,卸料孔处速度场密集度已非常明显,此时,卸料孔附近有可能出现起拱和堵塞。

4.3 卸料口径

初始模型基础上,选用卸料口径 1.8 m, 3.0 m 和 4.0 m 进行对比分析。

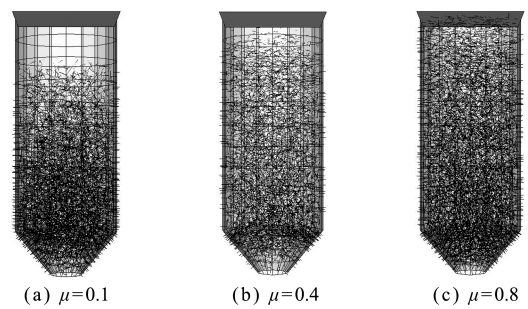


图 6 循环 10000 步接触力场(不同摩擦系数)

Fig. 6 Contact force field of the granular materials in different friction coefficients

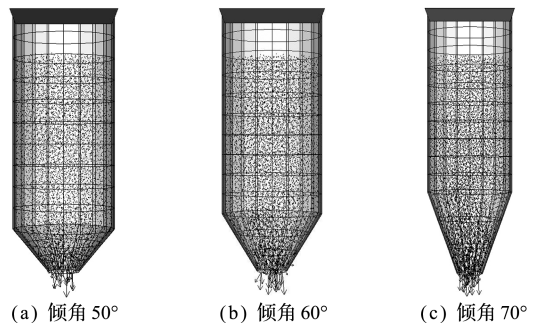


图 8 循环 10000 步速度场(不同倾角)

Fig. 8 Velocity field of the granular materials in different angles of inclination

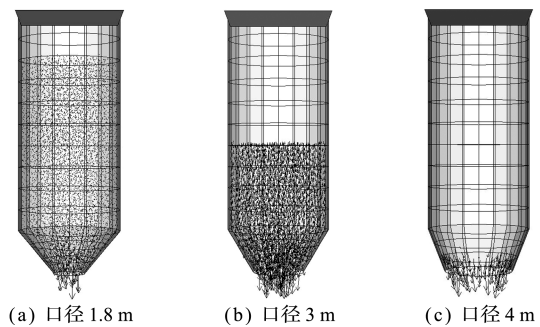


图 10 循环 10000 步速度场(不同卸料口径)

Fig. 10 Velocity field of the granular materials in different discharging pore size

图9为煤仓下部锥体在不同卸料孔开口半径下监测墙水平向侧压力随卸料循环变化曲线,可知在卸料阶段,开口越小,卸料过程中侧压力下降速度越小,原因是卸料口径大小决定着卸料的快慢和煤散料颗粒的流动速度。当卸料口半径达4.0 m时,侧压力在卸料孔打开的很短时间内迅速降为0,而卸料口半径为1.8 m时,在卸料循环到达30000时步时,侧压力值依旧很大。

图10为在不同卸料口径下卸料时煤仓颗粒系统速度场分布。可知卸料口径不同,其速度分布差异明显,在进行相同时步情况下,开口越大,煤仓内所剩颗粒越少,循环10000时步后,开口半径为4.0 m的煤仓内煤散料基本流出卸料孔。

5 结 论

(1) 对于深仓卸料流动,初始阶段煤仓上部大致保持整体流动状态,处于同一水平层的颗粒流动速度大致相同;大约在中间阶段,仓内煤散料卸料方式逐渐从单一的整体流动演变为整体流动与中心流动混合卸料方式;下部锥体内煤散料呈管状卸料流态,接近卸料通道处的煤散料流动最快,贴近仓壁面的煤散料流速较慢。

(2) 煤仓内壁面摩擦系数0.1~0.4时,煤散料流动从整体流变为中心流;摩擦系数0.4~0.8时,煤散料流动趋势变化不大,但颗粒间接触力变大,严重影响煤散料流动。

(3) 随着煤仓下部锥体倾角增大,水平方向侧压力逐渐增大;进入卸料阶段,倾角越大,侧压力下降速度越快;倾角达70°时,卸料孔处的速度场分布足够密集,易起拱和堵塞。因此,倾角过大对锥仓强度、疲劳和流动性都不利。

(4) 由于改变卸料孔开口半径使煤仓内部煤散料空间分布发生变化,卸料孔开口大小对锥体水平向侧压力影响较大。卸料口径越小,卸料过程侧压力下降速度越小,不容易发生煤仓结构疲劳破坏,但影响散料流动性。

参考文献(References):

[1] Matchett A J. The shape of the cohesive arch in hoppers and silos—some theoretical considerations [J]. *Powder Technology*, 2007, **171**(3):133-145.

[2] Cannavacciuolo A, Barletta D, Donsi G, et al. Arch-free flow in aerated silo discharge of cohesive powders [J]. *Powder Technology*, 2009, **191**(3):272-279.

[3] 楚锡华,周剑萍,徐远杰.筒仓泄料过程中阻塞现象的

数值模拟[J]. *计算力学学报*, 2009, **26**(3):342-346. (CHU Xi-hua, ZHOU Jian-ping, XU Yuan-jie. Numerical simulation for jamming during the discharge of granular materials from a silo [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2009, **26**(3):342-346. (in Chinese))

- [4] 薛铜龙. 矿井煤仓堵塞的原因分析和解决方法[J]. *煤炭科学技术*, 2009, **37**(3):71-72, 76. (XUE Tong-long. Cause analysis and resolution of mine coal bunker jam [J]. *Coal Science and Technology*, 2009, **37**(3):71-72, 76. (in Chinese))
- [5] Hessien Abd-el-rahim H. Experimental and theoretical analysis of dynamic effects in cement storage silos [J]. *Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej Wrocław*, 1991.
- [6] Janssen H A. Versuche über getreidedruck in silozellen [J]. *Zeitschr. d. Vereines Deutscher Ingenieure*, 1895, **39**(35):1045-1049.
- [7] Airy W. The pressure of Grain[A]. *Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers* [C]. London, 1897.
- [8] 王学文,杨兆建,王世文,等. 棱锥形斗仓粉体静压力分布[J]. *机械工程学报*, 2009, **45**(3):263-268. (WANG Xue-wen, YANG Zhao-jian, WANG Shi-wen, et al. Powder static pressure distributing on pyramidal silo [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, **45**(3):263-268. (in Chinese))
- [9] 付建宝,年廷凯,栾茂田,等. 浅圆仓散料侧压力的极限分析上限方法[J]. *工程力学*, 2009, **26**(8):150-154. (FU Jian-bao, NIAN Ting-kai, LUAN Mao-tian, et al. Upper bound solutions of limit analysis for lateral pressure of squat silos [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, **26**(8):150-154. (in Chinese))
- [10] Wang X W; Yang Z J, Shu X F, et al. The static contact statuses between granular materials and flat-bottomed steel silos [J]. *Powder Technology*, 2013, **235**:1053-1059.
- [11] Sadowski A J, Rotter J M. Buckling in eccentrically discharged silos and the assumed pressure distribution [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2013, **139**(7):858-867.
- [12] Hotaa E, Skotny L. Experimental investigations on the stability of stiffened cylindrical shells of steel silos [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2014, **96**:81-94.
- [13] Wang Y, Lu Y, Ooi J Y. Finite element modelling of wall pressures in a cylindrical silo with conical hopper using an Arbitrary Lagrangian-Eulerian formulation [J]. *Powder Technology*, 2014, **257**:181-190.

- [14] Vidyapati V, Subramaniam S. Granular flow in silo discharge: Discrete element method simulations and model assessment [J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2013, **52**(36):13171-13182.
- [15] 陶顺龙, 陆海峰, 郭晓镭, 等. 煤粉料仓通气下料流动行为[J]. 化工学报, 2014, **65**(4):1186-1193. (TAO Shun-long, LU Hai-feng, GUO Xiao-lei, et al. Flow behavior of aerated discharging of pulverized coal from hopper [J]. *CIESC Journal*, 2014, **65**(4):1186-1193. (in Chinese))

Flow pattern simulation and flow mechanical behavior influencing factors analysis of granular materials in silos

WANG Xue-wen^{*1,2}, QIN Yi², TIAN Yan-kang², YANG Xin-yu², YANG Zhao-jian¹

(1. Shanxi Key Laboratory of Fully Mechanized Coal Mining Equipment, School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Department of Design, Manufacture, and Engineering Management, University of Strathclyde, Glasgow, G1 1XQ, Scotland, UK)

Abstract: Aimed at the flow and mechanical behavior of granular materials in silos, the discrete element models are built on a silo and its storage granular material using DEM software PFC^{3D}. The mechanical model and solving steps are briefly covered, and the flow pattern of granular materials in silos is simulated. By studying the lateral pressure, particles velocity field and contact force field, the flow mechanical behavior influencing factors of friction coefficient, angle of inclination and discharging pore size are mainly discussed, aiming at the hoppers of silos. Results show that the granular material flow pattern in deep silos is a mixed pattern of overall flow and pipe flow. The friction coefficient, angle of inclination and discharging pore size have significant effects on the flow pattern and lateral pressure.

Key words: silo; granular material; particle; flow; lateral pressure; discrete element