

基于离散元-有限元耦合仿真的螺旋 数值模拟分析

张珂,张硕,于文达,邹德芳

(沈阳建筑大学机械工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究多螺旋布料器内螺旋强制推送骨料时的受力情况,针对螺旋易损坏、易磨损的问题,给出螺旋优化意见。**方法** 基于离散元-有限元(DEM-FEM)多物理场耦合理论建立螺旋输送物料理论模型,数值模拟分析混凝土骨料与螺旋间的相互作用力。**结果** 通过对比螺旋转动动力矩的仿真与实验结果,证明了数值模型准确性;螺旋在推送物料时,等效应力最大位置在螺旋叶片与螺旋轴焊接区域;多螺旋同时推送物料时,中间位置的螺旋所受等效应力整体高于两侧螺旋;对于单螺旋而言,螺旋叶片沿轴向方向上40~80 mm处表面受力最大,100~140 mm处受力最小,沿径向方向上外圈受力较大。**结论** 螺旋叶片内径增大或改为梯形截面可以减少焊接处应力集中的影响;螺旋叶片更换耐磨材料或适当增加叶片外圈厚度可以提高螺旋寿命;布料器中间位置螺旋选用高强度耐磨材料可提高寿命。

关键词 多螺旋布料器;螺旋;有限元;离散元;数值模拟

中图分类号 TH122

文献标志码 A

Numerical Simulation Analysis of Screw Based on Discrete Element-Finite Element Coupling Simulation

ZHANG Ke, ZHANG Shuo, YU Wenda, ZOU Defang

(School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The purpose of this paper is to study the force of the screw pushing aggregate in the multi-screw dispenser, and to give the screw optimization advice for the problem that the screw is easy to damage and wear. The research method is based on the discrete element-finite element (DEM-FEM) multiphysics coupling theory to establish a theoretical model of screw conveying materials, and numerically analyze the interaction force between concrete aggregate and screw. The result of the study is to prove the accuracy of the numerical model by comparing the simulation

收稿日期:2019-07-22

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0704003);辽宁省自然科学基金指导计划项目(20180551119);沈阳建筑大学科研创新培育计划项目(CXPY2017005)

作者简介:张珂(1969—),男,教授,博士,博士研究生导师,主要从事工程装备技术、精密加工技术等方面研究。

and experimental results of the screw rotation torque; When the screw pushes the material, the maximum position of the equivalent stress is in the welding area of the screw blade and the screw shaft; when the multi-screw pushes the material at the same time, the equivalent stress of the screw in the middle position is higher than on sides; For a single screw, the surface of the screw blade is subjected to the largest force at 40 ~ 80 mm in the axial direction, the force at the 100 ~ 140 mm is the smallest, and the outer ring is subjected to a large force in the radial direction. The research conclusion is that the increase of the inner diameter of the screw blade or the change to a trapezoidal section can reduce the effect of stress concentration at the weld; Replacing the wear-resistant material or appropriately increasing the thickness of the outer ring of the blade can improve the life of the screw; Screw in the middle position of the conveyor using high-strength wear-resistant materials can improve life.

Key words: multi-screw conveyor; screw; finite element; discrete element; mechanical properties

多螺旋布料器是生产混凝土预制构件(PC构件)的核心设备之一,广泛应用于装配式建筑行业。多螺旋布料器采用螺旋强制出料方式进行布料,其工作原理与螺旋输送机相似^[1-2]。在混凝土输送过程中,螺旋与混凝土通过不断接触和摩擦,出现磨损变形、断裂等破坏问题,导致布料器输送均匀性降低,难以实现精确化智能化的布料生产方式^[3-7]。

相关学者对于单螺旋出料的物料运动及相互作用的力学分析等研究做了大量工作: A. W. Roberts^[8]对垂直螺旋输送机进行了颗粒运动学与动力学分析,得到单个颗粒对螺旋的剪切力、法向力与摩擦力公式并给出输送量公式; P. W. Cleary 等^[9]对塔式磨机与针式磨机衬板表面能量吸收率等方面进行研究,得出塔式磨机与针式磨机的主要受力方式; M. Sinnott 等^[10]通过研究搅拌磨机内物料整体流动状态、能量耗散空间分布等,给出了剪切能量、法向能量的吸收情况; 李凯^[11]利用 DEM-FEM 耦合建模完成立式螺旋搅拌磨机的结构优化; 宁晓斌等^[12]通过 DEM-CFD 多学科耦合对螺旋搅拌器结构强度进行校核。与上述文献类似,当前研究的物料多为散料、干料,未能考虑具有粘结性物料与螺旋间的相互作用关系,特别是多螺旋输送的混凝土物料。

基于此,笔者以多螺旋布料器和具有粘

结特性的新拌混凝土为实验条件,通过多螺旋布料器输送机理与螺旋叶片的受力情况分析布料器的布料工艺,同时,基于 DEM-FEM 多物理场耦合方法对混凝土在输送过程中,螺旋的受力分布进行研究,预测最大受力位置与易磨损区域,为螺旋的优化设计与螺旋磨损预报研究打下基础。

1 布料工艺研究

1.1 多螺旋布料器输送机理

多螺旋布料器是预制构件生产线上主流的布料装置,具有布料效率高、精度高及输送量可控等特点。课题组根据“十三五混凝土布料机实验平台”的设备结构,通过等比例缩放的方式,设计了一种适用于混凝土布料实验的小型布料实验装置,基于三维软件 Solidwork 建模如图 1 所示。

由图 1 可知,布料机模型主要由料斗、打散棒、螺旋、出料闸门、螺旋电机及打散电机等结构组成。其中,打散棒与螺旋为关键性结构,螺旋由螺旋叶片与螺旋轴组成。物料在重力作用下填充到螺旋间隙后,出料闸门开启,螺旋电机带动螺旋转动将物料排出。打散棒在打散电机驱动下搅拌料斗内的混凝土物料,可以防止混凝土在料斗内长时间静置后出现离析、凝结等不良现象,同时,与螺旋组成协同运动,将混凝土物料快速填充到螺旋间隙中,进行新一轮的物料输送工作。

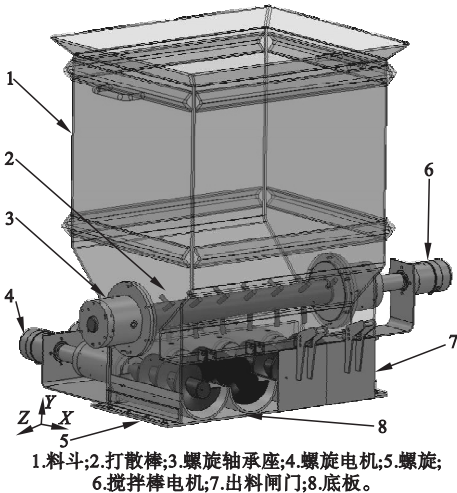


图1 多螺旋布料器三维模型
Fig. 1 3D model of multi-screw conveyor

1.2 螺旋叶片受力分析

对螺旋叶片的受力分析多采用单质点法,能够从物料的整体角度研究螺旋的受力情况。混凝土在实际输送过程中,螺旋受力情况复杂,为简化螺旋的受力分析过程,将单个砂石简化为质点,且砂石颗粒间不产生相对位移,利用理论计算对螺旋受力状态进行分析。图2为螺旋面展开下的颗粒受力状态图。

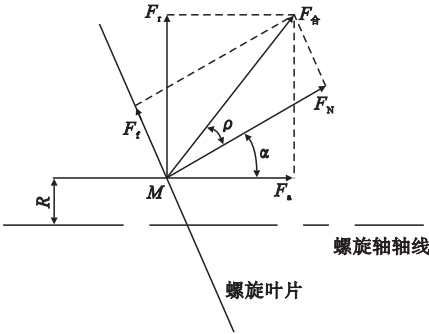


图2 颗粒受力状态图
Fig. 2 Particle force diagram

取螺旋叶片上距离轴线 R 处的砂石颗粒 M 为研究对象,此处螺旋升角为 α ,颗粒与叶片之间的摩擦系数为 μ 。在输送过程中,颗粒受到叶片的法向推力为 F_N 、颗粒与叶片之间的摩擦力 F_f ,二者合力为 $F_合$,忽略叶片表面粗糙度带来的影响, $F_合$ 与 F_N 之间的偏离角度为颗粒摩擦当量角 ρ 。将 $F_合$ 分

解为水平方向的轴向力 F_a 与竖直方向的周向力 $F_r^{[13-15]}$ 。

由图2可知轴向力 F_a 、周向力 F_r 、叶片与物料之间的摩擦力大小:

$$\begin{cases} F_a = F_合 \cdot \cos(\alpha + \rho), \\ F_r = F_合 \cdot \sin(\alpha + \rho), \\ F_f = F_合 \cdot \sin\rho. \end{cases} \tag{1}$$

式中: $\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{s}{2\pi R}\right)$, $\rho = \tan^{-1}\mu$, s 为螺距。

图3为物料对螺旋叶片作用力分解图,根据牛顿第三定律:

$$\begin{cases} F'_合 = -F_合, \\ F'_a = -F_a, \\ F'_r = -F_r. \end{cases} \tag{2}$$

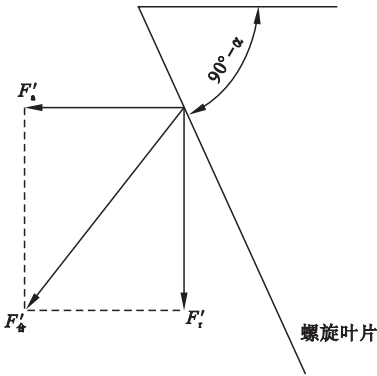


图3 螺旋受力状态图
Fig. 3 Screw blade force diagram

单质点理论直观地分析了螺旋受力的大小与方向,但是只能分析螺距内物料整体对螺旋的受力,而离散元理论可以将物料离散化,从而分析局部物料对螺旋的受力。

2 建立物料输送数值模型

2.1 布料器数值模型的建立

多螺旋布料器实验装置结构复杂,为方便模型分析、提高计算效率,在保证不影响螺旋受力分析的基础上,对布料器模型做出如下假设:

- 1) 布料器置于室内,忽略温度、雨雪等环境因素。
- 2) 支撑结构及动力装置等对螺旋受力

影响较小,建模时将其忽略。

多螺旋布料器三维模型导入离散元软件后可以自动划分网格,但网格尺寸过大无法有效地分析模型结构受力状态,需要通过其他网格划分软件重新划分。在研究多螺旋布料器内螺旋的受力状态时,忽略对料斗与闸门等结构的网格重新划分工作,在专业网格划分软件中新建螺旋网格模型,导入离散元软件中,替换原有螺旋,完成网格设置。同时,根据实际布料器几何参数与属性,设置布料器模型的密度、剪切模量等材料属性,螺旋、打散棒及出料闸门的运动属性,建立几何体仿真模型,具体属性参数如下:

材料属性:密度 $7\,850\text{ kg/m}^3$;剪切模量 $7.8 \times 10^{10}\text{ Pa}$ 。

运动特性:螺旋转速 30 r/min ,持续运动 5.5 s 后布料结束;打散棒转速 30 r/min ,持续运动 5.5 s 后布料结束;出料闸门转速 15 r/min ,持续运动 0.5 s 。

2.2 新拌混凝土数值模型的建立

新拌混凝土由水泥、石灰石、沙子、水等成分组成,水与水泥通过水化反应得到具有粘结作用的水泥浆,与石灰石、沙子搅拌后产物为具有粘结特性的新拌混凝土。因此,需要选用具有粘结性特征的颗粒接触模型模拟混凝土。

黏聚性微观接触模型不仅仅考虑了颗粒碰撞时的弹性变形,而且引入了表面能参数来计算颗粒间的相互吸引力,适用于分析具有明显黏聚性效应的混凝土颗粒^[16]。其模型中具有黏聚力颗粒法向力公式如下:

$$F_{黏聚力} = -4 \sqrt{\pi \gamma E^*} a^{\frac{3}{2}} + \frac{4E^*}{3R^*} a^3. \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{a^2}{R^*} - \sqrt{\frac{4\pi \gamma a}{E^*}}. \quad (4)$$

式中: λ 为法向重叠量; E^* 为等效杨氏模量; γ 为表面能; R^* 为等效粒子半径; α 为颗粒接触半径。

考虑到计算机的计算量问题,将新拌混

凝土简化为砂浆与骨料两种颗粒模型。利用球形颗粒进行新拌混凝土的模拟取得了较为理想的模拟分析效果^[17-19]。因此,采用球形大颗粒代表骨料,球形小颗粒代表砂浆,颗粒半径分别为 15 mm 、 8 mm 。以实际配料比进行数量计算,大、小颗粒数量分别为 $4\,755$ 、 $33\,310$ 个,完成颗粒工厂的建立。在黏聚性模型中设置大颗粒与小颗粒间的摩擦系数与表面能参数,完成新拌混凝土数值模型的建立。

2.3 数值模型实验验证

将布料器模型与新拌混凝土模型相结合,建立多螺旋布料器物料输送数值模型,采用物料输送实验进行仿真验证。验证实物平台如图4所示,主要结构包括四根螺旋、打散棒与出料闸门。为了使数值模拟尽可能接近实际,仿真中布料器属性参数的设置与实际布料器要尽量一致。

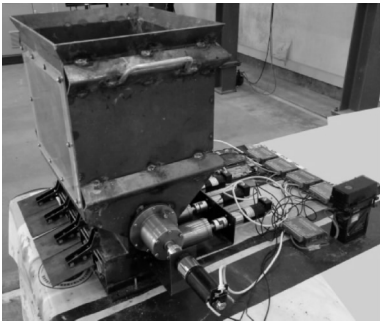


图4 多螺旋布料器实验装置

Fig. 4 The experimental device of multi-screw conveyor

多螺旋布料器的四根螺旋旋向沿图1中Z坐标轴负向分别为右、左、右、左,为两两异向分布在料斗中,取靠近料斗左侧的螺旋,对螺旋不同转速输送物料时,某一段时间内的电流、电压进行测量,将数据带入式(5)、式(6)可以得到螺旋在不同转速下的平均转矩,并与仿真数据相对比,如图5所示。

$$P = IU \times 10^{-3}. \quad (5)$$

$$T = 9\,550 \times 10^{-3} \frac{P}{n}. \quad (6)$$

式中: T 为螺旋在一定输送量下的平均转矩; P 为螺旋在一定转速下平均功率, W ; I 为螺旋在一定输送量下的平均电流值,mA; U 为螺旋在一定输送量下的平均电压值,V; n 为螺旋转速,r/min。

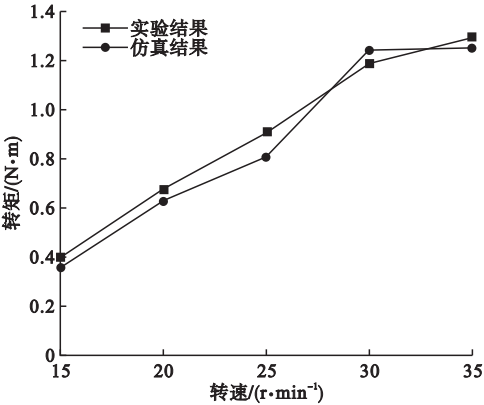


图 5 螺旋平均转矩随转速的变化

Fig. 5 The average torque curves of the screw
varying with the speed

由图 5 可以看出,仿真中螺旋转矩的数值始终在实验结果上下波动,说明多螺旋布料器转矩的仿真结果与实验结果非常接近,验证了离散元仿真结果的合理性。

3 基于 DEM-FEM 耦合的螺旋受力分析

3.1 物料颗粒受力分布分析

根据牛顿第三定律,螺旋叶片与物料颗粒群之间存在作用力与反作用力,分析颗粒群受力分布能够得到几何体表面所受压力的分布,从而进一步给出几何体的易磨损分布区域。图 6(a)和图 6(b)分别为 5 s、10 s 时刻的颗粒群合力分布图^[20]。

由图 6 可以看出,螺旋叶片轴向长度 130 mm,不同时刻螺旋叶片轴向颗粒受力最大的区域都分布在轴向方向 40 ~ 80 mm 处,布料器出料口位置(100 ~ 140 mm)处伸出料斗范围,减少了料斗内物料对其影响,使即将排出的颗粒间合力较小。因此,此处叶片所受压力最小。

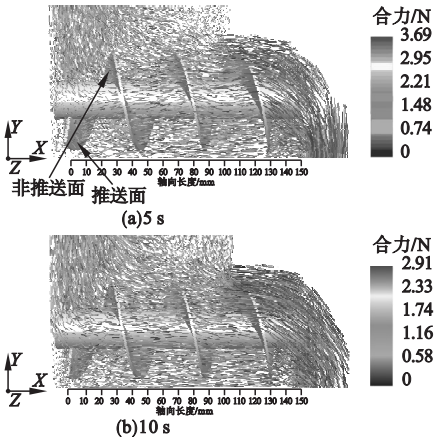


图 6 螺旋叶片轴向位置颗粒合力分布图

Fig. 6 The particle's force distribution of the
axial position of the screw blade

将图 6(a)中螺旋沿 X 坐标轴正方向 20 mm、55 mm、90 mm、125 mm 处切分 4 份,取各段剖面,如图 7 所示。图中可以明显观察到螺旋叶片各剖面位置上外圈颗粒受力较大,内圈颗粒受力较小。根据螺旋输送机理,推送面为螺旋叶片的主要受力面,由图 7(b)中标注。结合以上分析可知,在螺旋运动过程中,沿螺旋叶片轴向方向 40 ~ 80 mm 处外圈的推送面所受压力最大,则此处磨损程度最高。

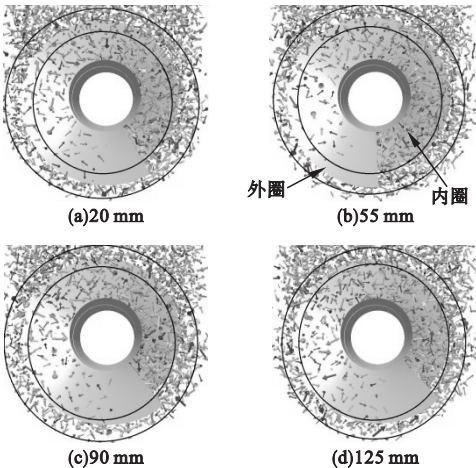


图 7 螺旋叶片径向位置颗粒合力分布图

Fig. 7 The particle's force distribution of the
radial position of the screw blade

3.2 单一螺旋受力分析

颗粒群的受力分布可以预测螺旋叶片表面压力情况,但无法给出螺旋最大受力位置

及受力大小的详细数据。螺旋整体的受力情况可以通过 FEM-DEM 耦合的方式给出。将颗粒与螺旋之间相互作用力加载到有限元中的静力学分析模块,分析螺旋在输送物料时的应力、变形状态,如图 8 和图 9 所示。

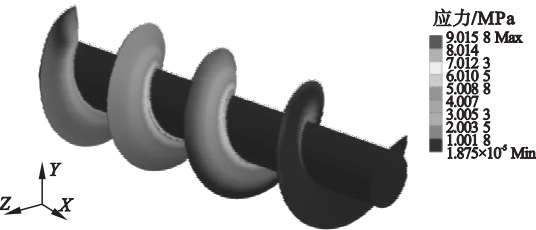


图 8 螺旋应力云图

Fig. 8 Screw stress cloud

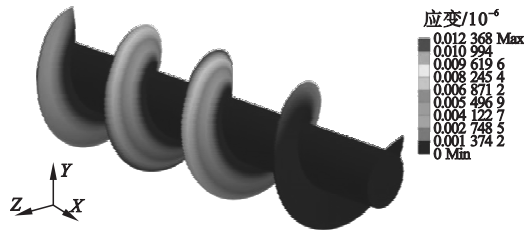


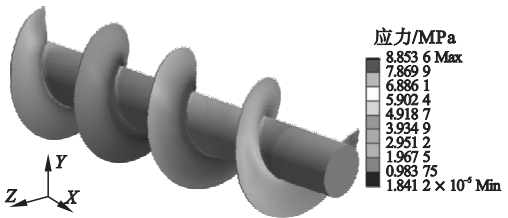
图 9 螺旋变形云图

Fig. 9 Screw deformation cloud

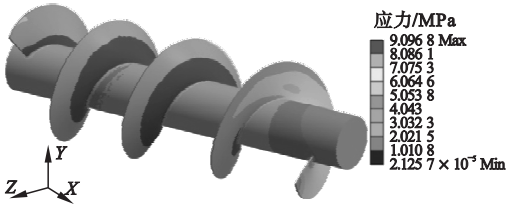
由图 8 可知,螺旋叶片焊接在螺旋轴上,二者连接部位存在较大的应力集中。因此,当物料载荷作用在螺旋上时,最大等效应力在螺旋叶片与螺旋轴连接部位。而且,沿螺旋正方向中间位置的受力要大于两端,与物料颗粒受力分布相符合。螺旋的变形出现在螺旋叶片上,中间变形更显著(见图 9)。由以上分析可知,螺旋的危险截面出现在叶片轴向中间部位的内径处,增大叶片内径或改为梯形截面可有效降低应力集中。

3.3 异向双螺旋受力分析

多螺旋布料器内四根螺旋由于安装位置不同,其同一时刻下受力也存在差异。而由于多螺旋布料器结构左右对称,只需分析一对异向螺旋的受力情况,如图 10 所示。



(a)螺旋1等效应力图



(b)螺旋2等效应力图

图 10 对旋螺旋等效应力云图

Fig. 10 Counter-screw equivalent stress cloud

相对于螺旋 1 而言,螺旋 2 更靠近布料器中间位置。当布料器内均匀布料时,得到异向对旋螺旋的受力对比分析图。对等效应力云图中数据,并将数据进行对数放大处理得到图 10。可以看出螺旋 1 上等效应力的变化梯度平缓,螺旋 2 上等效应力变化梯度较大,整体受力更大,且其靠近中心位置,作用力面积更宽。因此,相同输料条件下,布料器中间位置的螺旋更易出现损坏,更换高强度耐磨材料可以提高此位置螺旋寿命,减少螺旋更换次数,降低成本。

4 结 论

- (1)利用实验对离散元仿真中多螺旋布料器的螺旋转矩进行校核,证明了离散元仿真模型是准确的。
- (2)螺旋叶片沿轴向方向 40 ~ 80 mm 处,外圈受力最大,磨损最严重的,更换耐磨材料或增加螺旋轴向中间位置的叶片外圈厚度可以提高螺旋寿命。
- (3)单一螺旋危险截面位于螺旋叶片与螺旋轴连接部位,且沿轴向中间处受力最大。叶片内径加粗或梯形截面可有效减缓应力集中现象。比较异向旋转螺旋的受力,靠近布料器中心位置的螺旋整体受力更大,此处选

用高强度耐磨材料可以提高螺旋寿命。

参考文献

- [1] 戴恩亮. 基于离散元法的双螺旋输送机性能研究及优化[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
(DAI Enliang. Performance research and optimization of double screw conveyors based on discrete element method [D]. Wuhan: Wuhan University, 2018.)
- [2] 涂亚东. 螺旋输送机输送性能及螺旋体磨损研究[D]. 荆州: 长江大学, 2018.
(TU Yadong. Study on conveying performance and screw body wear of screw conveyor [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2018.)
- [3] CLEARY P W. DEM modelling of particulate flow in a screw feeder model description [J]. Progress in computational fluid dynamics, 2007, 7(2/3/4): 128 – 138.
- [4] DENG R, TAN Y, ZHANG H, et al. Experimental and DEM studies on the transition of axial segregation in a truck mixer [J]. Powder technology, 2017, 314: 148 – 163.
- [5] TALEBI K, MEMARIAN H, ROSTAMI J, et al. Modeling of soil movement in the screw conveyor of the earth pressure balance machines (EPBM) using computational fluid dynamics [J]. Tunnelling and underground space technology, 2015, 47: 136 – 142.
- [6] 李斌, 王凯威, 柯安娜. 混凝土搅拌机螺旋叶片参数化设计方法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(2): 335 – 343.
(LI Bin, WANG Kaiwei, KE Anna. The parametric design method for helical blades of concrete mixer truck [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2015, 31(2): 335 – 343.)
- [7] LIU H, LI P, XIAO H, et al. The fluid-solid coupling analysis of screw conveyor in drilling fluid centrifuge based on ANSYS [J]. Petroleum, 2015, 1(3): 251 – 256.
- [8] ROBERTS A W. The influence of granular vortex motion on the volumetric performance of enclosed screw conveyors [J]. Powder technology, 1999, 104(1): 56 – 67.
- [9] CLEARY P W, SINNOTT M, MORRISON R. Analysis of stirred mill performance using DEM simulation; part 2-coherent flow structures, liner stress and wear, mixing and transport [J]. Minerals engineering, 2006, 19(15): 1551 – 1572.
- [10] SINNOTT M, CLEARY P W, MORRISON R. Analysis of stirred mill performance using DEM simulation; part 1-media motion, energy consumption and collisional environment [J]. Minerals engineering, 2006, 19(15): 1537 – 1550.
- [11] 李凯. 立式螺旋搅拌机粉磨过程数值模拟研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
(LI Kai. Study on the numerical simulation of the vertical screw stirred mill grinding process [D]. Changchun: Jilin University, 2016.)
- [12] 宁晓斌, 孙新明, 余翊妮, 等. 搅拌磨 DEM-CFD 耦合仿真研究及搅拌器强度分析[J]. 有色金属工程, 2016, 6(4): 63 – 67.
(NING Xiaobin, SUN Xinming, SHE Yini, et al. Research of multidisciplinary coupling simulation of the vertical stirred mill based on DEM-CFD and analysis of the screw agitator structural strength [J]. Nonferrous metals engineering, 2016, 6(4): 63 – 67.)
- [13] 向冬枝, 徐余伟. 螺旋输送机设计参数的选择和确定[J]. 现代面粉工业, 2008(5): 29 – 33.
(XIANG Dongzhi, XU Yuwei. Design parameter selection of spiral conveyor [J]. Modern flour milling industry, 2008(5): 29 – 33.)
- [14] 王东霞. 螺旋输送机的数值分析及优化设计的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2012.
(WANG Dongxia. The studies of numerical analysis and optimization design of screw conveyor [D]. Zhengzhou: He'nan University of Technology, 2012.)
- [15] 王默. 基于离散元的盾构螺旋输送机输送机理及其特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
(WANG Mo. Study on conveying mechanism and characteristics of shield screw conveyor based on DEM [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.)
- [16] JOHNSON K L, KENDALL K, ROBERTS A D. Surface energy and contact of elastic solids [J]. Proceedings of the royal society a, 1971, 324(1558): 301 – 313.
- [17] SHYSHKO S, MECHTCHERINE V. Developing a discrete element model for simulating fresh concrete: experimental investigation and modelling of interactions between discrete aggregate particles with fine mortar between them [J]. Construction and building materials, 2013, 47: 601 – 615.
- [18] REMOND S, PIZETTE P. A DEM hard-core soft-shell model for the simulation of concrete flow [J]. Cement and concrete research, 2014, 58: 169 – 178.
- [19] TAN Y, CAO G, ZHANG H, et al. Study on the thixotropy of the fresh concrete using DEM [J]. Procedia engineering, 2015, 102: 1944 – 1950.
- [20] 马腾. 基于离散元数值模拟的砂卵石地层盾构掘进刀盘磨损特性研究[J]. 铁道标准设计, 2017(11): 89 – 94.
(MA Teng. Study on cutterhead wear characteristics in shield tunneling in sandy pebble stratum based on discrete element numerical simulation [J]. Railway standard design, 2017(11): 89 – 94.)
(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)