

基于离散元技术的胶带端部采样器设计参数优化

倪文婧

(天地科技股份有限公司,北京 100013)

摘要:基于离散元仿真技术对输煤胶带端部的采样运动参数进行研究。通过改变端部采样切割斗在 4×30 个直径为 50 mm 颗粒料流模型中的运动速度,研究收集的颗粒粒子种类和数量。结果显示,随着切割斗运动速度从 1 m/s 升到 2 m/s,收集的颗粒总数从 2 006 个降至 958 个,相当于胶带中部采样宽度从 835 mm 降至 399 mm。将横截面为 4×30 个颗粒的料流水平分为 30 种颗粒的模型中,采样斗收集颗粒的标准差与切割速度无关,在切割速度 1.5 m/s 时标准差最大,为 3.69,切割速度为 1 m/s 时标准差最小,为 2.43;将横截面为 4×30 个颗粒的料流垂直分为 4 种颗粒的模型,采样斗收集颗粒的标准差与切割速度呈弱线性相关,切割速度 1 m/s 时的标准差最大,为 84.98,切割速度 1.7 m/s 时的标准差最小,为 53.19。不同切割速度下,切割斗对远端和底层的采集效果较差,在设计中应向胶带方向加大采样斗进料口长度,提高对底层煤粒的收集效果。

关键词:离散元;胶带端部;采样;运动参数;料流模型

中图分类号:TD9

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2019)04-0158-07

Application of discrete element technology in optimizing design parameters of belt end sampler

NI Wenjing

(Tiandi Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: Based on the discrete element simulation technology, the sampling motion parameters at the end of coal conveying belt were studied. By changing the moving speed of the end sampling and cutting bucket in the material flow model of 50 mm diameter particles with cross section of 4×30 , the kinds and quantities of particles collected were counted. The results show that with the increase of the moving speed of the cutting bucket from 1 m/s to 2 m/s, the total number of particles collected decreased from 2 006 to 958, which is equivalent to the sampling width of 835 mm to 399 mm in the middle of the belt. In the model of dividing 4×30 material flow into 30 kinds of particles horizontally, there is no correlation between the standard deviation of particles collected by sampling bucket and cutting speed. The standard deviation of particles collected by sampling bucket is the largest at cutting speed of 1.5 m/s, which is 3.69, and the smallest at cutting speed of 1 m/s, which is 2.43. In the model of dividing 4×30 material flow vertically into 4 kinds of particles, the standard deviation of particles collected by sampling bucket is weakly linear with cutting speed. The maximum standard deviation is 84.98 at cutting speed of 1 m/s and 53.19 at cutting speed of 1.7 m/s. The results show that the effect of the primary sampler at the end of belt on the end of sampling direction and the bottom is not ideal at different cutting speed. In the design, the length of the inlet and outlet of sampling hopper should be increased in the direction of belt to improve the effect of collecting coal particles at the bottom.

Key words: discrete element method; the end of belt; sampling; motion parameter; flow model

0 引言

国内引进端部采样技术近 30 多年,1998 年,霍林河一号露天矿引进美国兰西姆公司的胶带端部采

样器,采样量为 926 kg^[1]。在铁矿石采样中,上海宝钢、北仓一期和青岛矿石码头引进日本设备,北仓二期引进了德国设备,马迹山矿石码头采用美国设备。其中马迹山矿石码头的切割斗开口尺寸不可调,切

收稿日期:2019-04-10;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.19041010

作者简介:倪文婧(1981—),女,河北石家庄人,高级工程师,从事工程项目管理工作。E-mail:43327399@qq.com

引用格式:倪文婧.基于离散元技术的胶带端部采样器设计参数优化[J].洁净煤技术,2019,25(4):158-164.

NI Wenjing. Application of discrete element technology in optimizing design parameters of belt end sampler[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(4): 158-164.



移动阅读

割速度调节范围为 $0.6 \sim 1.2 \text{ m/s}^{[2]}$ 。对于无法实现胶带中部机械化采样,特别是生产矿井甚至工作面的原煤,其煤流具有粒度分布范围广、大块煤粒度过大等特点,采样器安装在输煤胶带端部,一般在胶带转接塔内,无需大规模土建施工,缩短建设工期,降低建设资金,与胶带中部采样相比,端部采样更适合粒度和采样量需求较大的原煤采样。

近年来,煤炭采制样理论方面和胶带中部采样系统的研究较为深入,孙刚等^[3]对煤炭采样重要理论进行了分析和定量关系的推导,补充和完善了煤炭采样理论;刘金国^[4]分析了宽胶带大煤流胶带中部采制样系统工作原理和技术特点,对系统工艺、关键技术参数、系统总体、单元设备、低压配电等进行了总体介绍。而针对端部采样的研究不够深入,姚元书^[5-6]进行了胶带端部采样的可行性研究和前期技术研究,阐述了其可行性和必要性,并进行了工艺流程分析。

在胶带端部机械化采制样系统中,胶带端部初级采样器是系统核心设备;初级采样器作为整个系统流程的第一步,其采样精度决定了采制样系统的精度。同时,初采器作为唯一与输煤胶带有关联的装置,其稳定性不只影响整个采制样系统的稳定性,还直接影响到主运输胶带的正常工作及生产安全。但是胶带端部初级采样器在原煤采样方面没有大量的实际应用数据作为确定设计参数的支撑,新开发的煤炭端部初级采样器需要在设计阶段进行相关参数的优化。

随着 CAD、CAE 技术的发展,离散单元法提供了可定量分析优化的方法^[7]。2002 年开始离散元应用到煤炭相关领域,早期离散元理论被用于放顶煤研究,如综放顶煤放出规律与放煤布局的关系^[8],顶煤放出体扩展过程及放煤步距、放煤间距等影响顶煤放出规律^[9],急倾斜煤层的放顶煤规律^[10]等。2011 年成熟的离散元分析软件应用于国内散状物料的振动筛分研究,李洪昌等^[11]确定了振动筛的最佳运动学参数。2015 年应用于煤炭机械化采制样系统,主要用于胶带中部初级采样器和旋转缩分器的仿真分析,沈宏明^[12]对胶带中部初级采样器采样头采样过程进行了研究;王阳阳^[13]引入颗粒颜色标定,对离散元模型中的颗粒进行分类,对缩分器缩分效果进行定量分析。曲芳等^[14]采用离散元软件设计了井下挖掘装载一体机的车体;毛君等^[15]采用离散元软件对滚筒采煤机的工作性能进行仿真分析,研究结果为采样机高效截割提供了改进参考;徐婵等^[16]研究了滚筒逆转情况下不同转速

的装煤效率,提出滚筒转速的最佳取值范围;包建华等^[17]对双滚筒采煤机截割过程进行了仿真。

胶带端部初级采样器的离散元仿真尚未有人涉及,本文采用离散元技术对端部采样进行仿真,通过 C++ 计算机编程语言生成可被离散元软件识别的 DLL 动态连接库文件,对离散元模型初始状态的每个粒子大小、粒子种类、位置和初始速度进行人为精确控制,通过对切割斗收集的颗粒粒子种类和数量进行统计分析,从而找到一种在设计阶段对其全断面采样能力进行判断的方法。

1 端部采样工艺基本模型

1.1 端部采样作业过程

典型端部采样系统如图 1 所示,系统采取一级破碎一级缩分设计。胶带端部初级采样器为整个系统流程的第 1 步,也是系统核心设备,其采样精度决定了采制样系统的采样精度。端部初级采样器采样后,经转运皮带进入破碎机,同时把煤流拉长,降低其对下游设备的冲击;之后破碎机进行破碎,导入皮带缩分机进行缩分;缩分后的煤样进入样品收集器,其他煤流进入弃料皮带机返回主胶带。除胶带端部初级采样器外,其他设备与胶带中部采样系统通用。

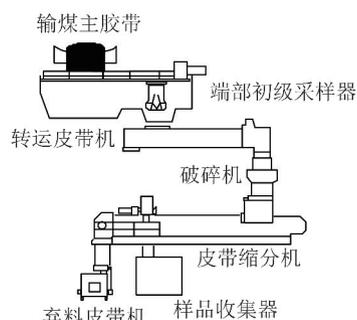


图 1 胶带端部采样系统

Fig. 1 Belt end sampling system

胶带端部初级采样器的采样流程如图 2 所示,采样过程分为 4 个步骤:① 不采样时,采样斗停在煤样落料口另一端,对煤流无任何干扰;② 采样时,下闸门处于关闭状态,采样斗经过煤流区时,样料由入料口进入采样斗;③ 采样斗运动到煤样落料口时,下闸门开启,样料由煤样落料口进入下一级设备;④ 采样斗返回原位,采样斗下闸门处于开启状态,煤流由下端料口流出,空斗返回原位,采样过程完成。

1.2 基于离散元技术采样精密度模型

在实际操作过程中,初级采样器的采样精度最终通过对整个采样系统的偏倚试验来确定。在设计阶段只有相关通用的技术要求来约束:① 切割器两

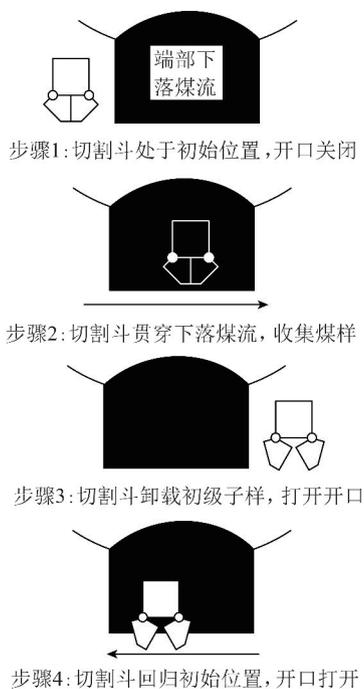


图2 端部初级采样器采样流程

Fig. 2 Sampling flow chart of belt end primary sampler

边板平行,并沿着与胶带中心线垂直的方向切割煤流;②切割器切取一个完整的煤流横截段为一个子样,该横截段可与胶带中心线垂直,也可以倾斜;③切割器的速度越快越好,但必须均匀,任一点的速度变化不得超过预定速度的10%。对于采样粒度分析试样,切割器的速度不能快到将煤粒击碎;④切割器有效开口尺寸至少为被采样煤标称最大粒度的3倍;⑤切割器的容量应能在煤流预计最大流量下,完全收集一个完整子样;⑥试验证明没有实质性偏倚。

通过离散元技术,对煤粒进行分类,可精确计算子样中每一类煤粒的数量和占比,以及总量中每一种粒子的占比,可从微观尺度确定其对煤流断面不同位置的采样精度。

在输煤胶带上把粒子按竖直方向等分为4种颗粒,水平方向等分为30种颗粒,通过水平移动的切割斗进行收集,统计其颗粒种类和数量。由于在胶带上不同粒子种类的颗粒数量相等,可使用收集的初级子样(即切割斗中收集到的颗粒)标准差 S (式(1))对其采样精密度进行判断,标准差越小,精密密度越高。

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - r)^2} \quad (1)$$

式中, x_i 为切割斗采集到每种颗粒的数量; r 为系列单个数据 x_i 的样本均值; N 为分层模型中颗粒的种类数量。

2 端部采样分析模型确定

2.1 端部采样机参数

引入煤炭科学技术研究院有限公司设计的SEB-2000胶带端部初级采样器为研究对象,其三维模型如图3所示。电动机通过联轴器带动链轮旋转,从而带动链条移动,采样行车固定在链条上,车下悬挂采样斗,采样斗上有可调节开口的人料口,下有可控开启和关闭的闸门。



图3 胶带端部初级采样器模型

Fig. 3 Model of belt end primary sampler

SEB-2000胶带端部初级采样器的料斗开口宽度0.3 m,切割线速度1~2 m/s可调,料斗容积0.253 m³,电机功率7 kW,切割斗运行距离3.95 m。

2.2 离散元仿真模型建立

为了提高离散元仿真的计算速度,且不失一般性,本文使用球形颗粒对煤炭粒子进行替代。采用Hertz-Mindlin无滑动接触模型,半径分别为 R_1 、 R_2 的两球形颗粒发生弹性接触,计算公式为

$$\alpha = R_1 + R_2 - r_1 - r_2 \quad (2)$$

式中, α 为法向重叠量; r_1 、 r_2 为两颗粒球心位置矢量。

颗粒间的接触面为圆形,接触半径 a 为

$$a = \sqrt{\alpha R^*} \quad (3)$$

式中, R^* 为等效粒子半径。

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (4)$$

颗粒间法向力 F_n 的计算公式为

$$F_n = \frac{4}{3} E^* (R^*)^{1/2} \alpha^{3/2} \quad (5)$$

式中, E^* 为等效弹性模量。

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (6)$$

式中, E_1 、 E_2 、 ν_1 、 ν_2 分别为颗粒1和颗粒2的弹性模量和泊松比。

形成煤流和端部初级采样器的煤和钢材的材料属性见表1。

表1 材料参数

Table 1 Material parameters

样品	泊松比	剪切模量/MPa	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
煤	0.5	10^2	1 400
钢铁	0.3	10^4	7 850

表2为煤-煤、煤-钢铁相互作用的作用系数,是影响煤粒间相互作用及煤粒与胶带端部初级采样器间相互作用的碰撞相关参数。

表2 材料相互作用系数

Table 2 Material interaction coefficients

项目	恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
煤-煤	0.5	0.5	0.01
煤-钢铁	0.5	0.4	0.05

采用横截面为矩形的煤流进行模拟,颗粒直径为50 mm,煤流截面为 4×30 分布的颗粒,长1 500 mm,宽200 mm,如图4所示。以3.15 m/s的速度斜向上 11° 抛出,每次生成颗粒 4×30 个,每隔0.018 s生成一个截面,从而形成连续的料流。

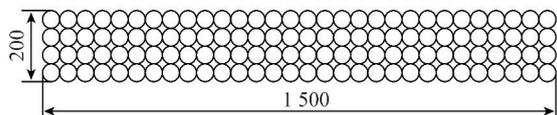


图4 煤流截面颗粒排列示意

Fig. 4 Sketch of particle arrangement in coal flow section

3 端部采样离散元模型参数确定

3.1 切割斗位置计算

为了确定切割斗的位置,需要计算主胶带抛出的煤流落体轨迹,以煤流中心位置颗粒为原点,速度为3.15 m/s,斜向上 11° 抛出,通过自由落体公式(式(7))计算得出其抛落轨迹如图5所示。

$$\begin{cases} x = v \cos \theta t \\ y = -v \sin \theta t + \frac{1}{2} g t^2 \end{cases} \quad (7)$$

把切割斗开口对准抛落的料流,得到切割斗的具体位置,如图6所示,其中高度 $H=1.138$ m,水平距离 $L=1.064$ m。

3.2 水平分层模型和垂直分层模型

为了考察切割斗对煤流的采样效果,将煤流颗粒分类,通过DLL动态连接库文件定义其粒子种类、位置和初始速度。建立2种模型:①水平分层颗粒模型,分析切割斗在水平方向的采样效果;②垂直分层颗粒模型,分析切割斗在垂直方向

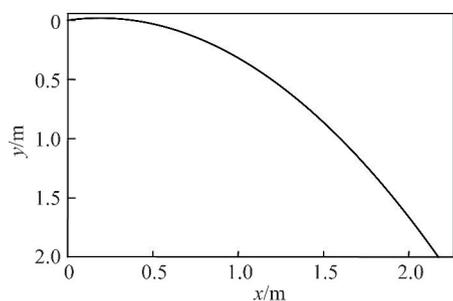


图5 煤流中心颗粒抛落轨迹

Fig. 5 Trajectory of coal flow center particle dropping

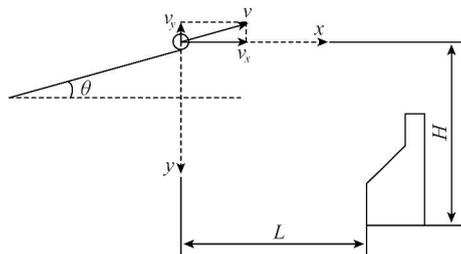


图6 切割斗位置示意

Fig. 6 Sketch of cutting bucket position

的采样效果。

水平分层颗粒模型中,在水平方向分别设置30组直径为50 mm的颗粒,以3.15 m/s的速度斜向上 11° 抛出,每组4个颗粒。30组颗粒从距离采样斗初始位置由远到近分别记为煤粒01、煤粒02、煤粒03、...、煤粒29和煤粒30,如图7所示。

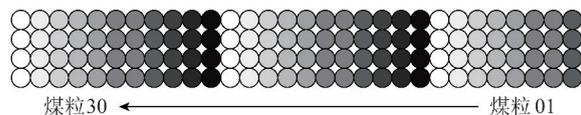


图7 水平分布颗粒模型示意

Fig. 7 Sketch of horizontal distribution particle model

垂直分布颗粒模型中,在垂直方向分别设置4组直径为50 mm的颗粒以3.15 m/s的速度斜向上 11° 抛出,每组30个颗粒。4组颗粒从上到下分别被标记为煤粒1~4,如图8所示。



图8 垂直分布颗粒模型示意

Fig. 8 Sketch of vertical distribution particle model

4 优化计算结果与分析

设定切割斗的平移速度1~2 m/s,间隔0.1 m/s进行调整,针对2个颗粒模型分别进行11次离散元仿真,时间间隔为0.001 s,计算总时长为4.0 s,数据储存间隔为0.01s,网格尺寸0.05 m,网格数量34 320个。计算完成后,统计切割斗截取的颗粒

粒子种类和数量,导入 tecplot 数据处理软件中,2个颗粒模型中切割斗内截取颗粒总数与切割斗移动速度的关系曲线一致,如图9所示,随着切割斗移动速度的增加,切割斗截取的颗粒数量从2 006降至958个,相当于胶带中部采样宽度为835~399 mm。

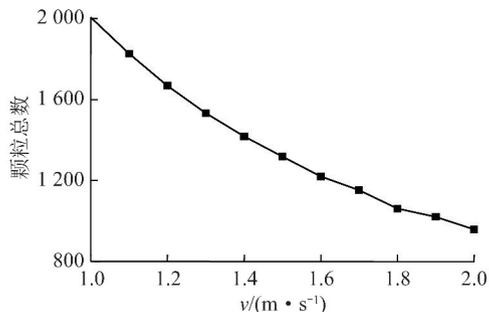


图9 切割斗截取颗粒总数随移动速度变化曲线

Fig. 9 Curve of total number of particles intercepted by cutting bucket via velocity

4.1 水平分层颗粒模型

图10为水平分层颗粒模型下,切割斗速度为1.5 m/s时的颗粒分布,收集的颗粒数量见表3。可以看出,水平分层模型下,30种颗粒分布的饼图面积近似,位于中部的煤粒19颗粒数最少,为38个,位于最尾端的煤粒30颗粒数最多,为58个,通过对从1~2 m/s的10个其他速度下水平分层颗粒模型的计算结果也可得出,切割斗对近端的煤样采集偏多,但是实际上,煤流截面为梯形截面,两端煤流厚度较小,所以对颗粒分布影响不大。



图10 水平分层颗粒模型收集的颗粒饼图(切割斗速度1.5 m/s)

Fig. 10 Particle pie diagrams collected in horizontal distribution particle model(cutting bucket velocity is 1.5 m/s)

通过对11次离散元仿真结果求标准差 S_1 ,得出标准差与切割斗速度的关系曲线如图11所示,在切割速度1.5 m/s时标准差最大,为3.69,在1 m/s时标准差最小,为2.43。在水平分层颗粒模型下,切割速度和切割斗截取不同颗粒的标准差的线性相关系数 $R=0.054$,无线性相关性。

4.2 垂直分层颗粒模型

图12为垂直分层颗粒模型下,切割斗速度为1.5 m/s时的颗粒分布,可以看出,垂直分层模型下

表3 水平分层模型切割斗收集的颗粒数量
(切割斗速度1.5 m/s)

Table 3 Particles' number collected in horizontal distribution particle model(cutting bucket velocity is 1.5 m/s)

种类	颗粒数量	种类	颗粒数量	种类	颗粒数量
煤粒01	42	煤粒11	46	煤粒21	45
煤粒02	44	煤粒12	43	煤粒22	45
煤粒03	47	煤粒13	46	煤粒23	45
煤粒04	45	煤粒14	42	煤粒24	44
煤粒05	40	煤粒15	44	煤粒25	45
煤粒06	44	煤粒16	46	煤粒26	41
煤粒07	40	煤粒17	45	煤粒27	42
煤粒08	39	煤粒18	39	煤粒28	45
煤粒09	43	煤粒19	38	煤粒29	49
煤粒10	42	煤粒20	44	煤粒30	58

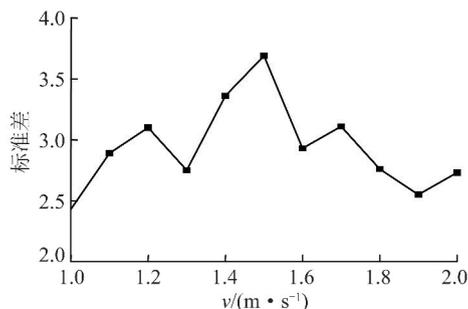


图11 水平分层模型的标准差与切割斗速度的关系

Fig. 11 Curve of standard deviation of horizontal distribution model via cutting bucket velocity

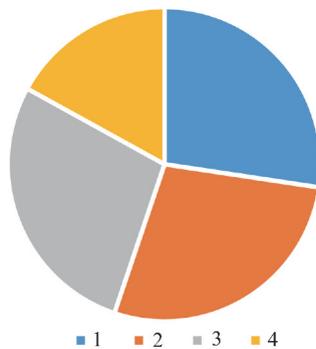


图12 垂直分层颗粒模型收集的颗粒饼图(切割斗速度1.5 m/s)

Fig. 12 Particle pie diagrams collected in vertical distribution particle model(cutting bucket velocity is 1.5 m/s)

4种颗粒分布的饼图面积差距较大,当上层颗粒与采样斗相互作用后,由于重力作用下降,而位于最下层的颗粒会有部分被挤出采样斗的采样范围。收集的煤粒1~4数量分别为359、365、365、233,煤粒4数量最少,煤粒2和煤粒3最多。可以认为,胶带端部平移式初级采样器对位于上侧的煤粒1、煤粒2和煤粒3为等概率采样,对最下层的煤粒4采样不

足。在使用中,需调整采样斗位置和开口大小,加强对底层颗粒的收集。

通过对 11 次离散元仿真的结果求标准差 S_2 , 得出标准差与切割斗速度的关系如图 13 所示,可以看出,切割速度 1 m/s 时的标准差最大,为 84.98,切割速度 1.7 m/s 时的标准差最小,为 53.19。在垂直分层颗粒模型下,采样斗收集到颗粒的标准差与切割速度的线性相关系数 $R=0.903$,呈弱线性相关。

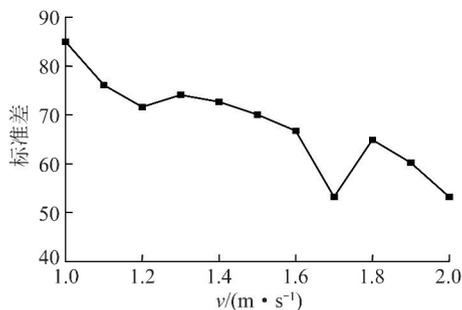


图 13 垂直分层模型标准差与切割斗速度的关系

Fig. 13 Curve of standard deviation of vertical distribution model via cutting bucket velocity

5 结 论

1) 随着切割斗运动速度从 1 m/s 升至 2 m/s , 穿过煤流截取到的颗粒总数从 2 006 个降至 958 个, 相当于胶带中部采样宽度从 835 mm 降至 399 mm, 即通过改变胶带端部初级采样器的切割斗移动速度, 可调整采样量。

2) 将 4×30 个颗粒料流水平分为 30 种颗粒的模型中, 采样斗收集到颗粒的标准差与切割速度线性相关系数为 0.054, 切割速度 1.5 m/s 时标准差最大, 为 3.69; 切割速度 1 m/s 时标准差最小, 为 2.43, 在水平分层颗粒模型中, 切割速度和切割斗截取不同颗粒的标准差无线性相关性。

3) 将 4×30 个颗粒料流垂直分为 4 种颗粒的模型中, 采样斗收集到颗粒的标准差与切割速度的线性相关系数为 0.903, 切割速度 1 m/s 时标准差最大, 为 84.98, 切割速度 1.7 m/s 时标准差最小, 为 53.19。在垂直分层颗粒模型中, 切割速度和切割斗截取不同颗粒的标准差呈弱线性相关。

4) 不同切割速度下, 胶带端部初级采样器对采样方向末端和底层的采集效果均不理想, 在设计中应向胶带方向加大采样斗进料口长度, 提高对底层煤粒的收集效果。

参考文献 (References):

[1] 吕英. 兰姆西煤炭采样机简介[J]. 露天采煤技术, 1993(3):

33.

- [2] 郑雪纬. 国内部分港口铁矿石采样工艺及设备现状综述[J]. 港工技术, 2008(3):9-12.
ZHENG Xuewei. Discussions on present status of iron ore sampling equipment in ports of China[J]. Port Engineering Technology, 2008(3):9-12.
- [3] 孙刚, 方全国, 郑凤轩, 等. 煤炭采样重要理论问题的分析[J]. 煤炭学报, 2013, 38(7):1283-1286.
SUN Gang, FANG Quanguo, ZHENG Fengxuan, et al. Analysis of main theoretical problems on coal sampling[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(7):1283-1286.
- [4] 刘金国. 宽胶带大流量移动煤流自动化采样技术[J]. 煤炭学报, 2008, 33(6):690-693.
LIU Jinguo. Automatic sampling technology in wide belt conveyor with big volume of coal flow[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(6):690-693.
- [5] 姚元书. 胶带端部采样系统研制的可行性分析[J]. 煤质技术, 2015(1):34-36.
YAO Yuanshu. Feasibility analysis of the research of belt end sampling system[J]. Coal Quality Technology, 2015(1):34-36.
- [6] 姚元书. 胶带端部采样技术研究[J]. 煤质技术, 2015(2):16-18, 30.
YAO Yuanshu. Technological research on sampling and sample preparation on belt end[J]. Coal Quality Technology, 2015(2):16-18, 30.
- [7] 王国强, 郝万军, 王继新. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2010.
- [8] 蒋金泉, 曲华, 谭云亮. 综放顶煤放出规律与放煤步距的离散元仿真研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18):3070-3075.
JIANG Jinqian, QU Hua, TAN Yunliang. Numerical simulation by distinct element code on drawing law and interval of fully-mechanized coal mining with caving method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(18):3070-3075.
- [9] 谢广祥, 黄金桥. 顶煤放出规律计算机可视化仿真[J]. 煤炭学报, 2002, 27(3):264-267.
XIE Guangxiang, HUANG Jinqiao. Computer visualization simulation of top coal drainage law[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(3):264-267.
- [10] 武建文. 急倾斜水平分段放顶煤顶煤放出规律研究[D]. 西安:西安科技大学, 2006.
- [11] 李洪昌, 李耀明, 唐忠, 等. 基于 EDEM 的振动筛数值模拟与分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5):117-121.
LI Hongchang, LI Yaoming, TANG Zhong, et al. Numerical simulation and analysis of vibration screening based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5):117-121.
- [12] 沈宏明. 基于 EDEM 的煤炭采样初采器仿真模拟与分析[J]. 煤质技术, 2015(2):28-30.
SHEN Hongming. Numerical simulation and analysis of coal sampler via EDEM[J]. Coal Quality Technology, 2015(2):28-30.
- [13] 王阳阳. 基于离散元的旋转缩分器仿真方法研究[J]. 煤矿机械, 2015, 36(11):80-81.
WANG Yangyang. Research of spinning split device based on dis-

- crete element method[J]. Coal Mine Machinery, 2015, 36(11): 80-81.
- [14] 曲芳, 沈斌, 赵丽坤. 基于 EDEM 的井下挖掘装载一体机主车体设计研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2016(4): 13-17.
QU Fang, SHEN Bin, ZHAO Likun. Design and research of underground mining loader's main body based on EDEM[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2016(4): 13-17.
- [15] 毛君, 刘歆妍, 陈洪月, 等. 基于 EDEM 的采煤机滚筒工作性能的仿真研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(4): 1069-1077.
MAO Jun, LIU Xinyan, CHEN Hongyue, et al. Simulation research of shearer drum cutting performance based on EDEM[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(4): 1069-1077.
- [16] 徐婵, 王义亮, 谢嘉成, 等. 离散元方法在滚筒采煤机装煤仿真中的应用[J]. 计算机辅助工程, 2017, 26(1): 70-74.
XU Chan, WANG Yiliang, XIE Jiacheng, et al. Application of discrete element method in coal-loading simulation of drum shearer[J]. Computer Aided Engineering, 2017, 26(1): 70-74.
- [17] 包建华, 王阳阳, 张悦. 基于离散元的双滚筒采煤机截割过程仿真分析[J]. 煤矿机械, 2018, 39(7): 60-62.
BAO Jianhua, WANG Yangyang, ZHANG Yue. Simulation analysis of working process for double drum-type shearer via discrete element method[J]. Coal Mine Machinery, 2018, 39(7): 60-62.