第 28 卷第 10 期 Volume 28 Number 10 2018 年 10 月 October 2018

DOI: 10.19476/j.ysxb.1004.0609.2018.10.25

不同偏心距滚筒中大颗粒的 平均速度脉动特性



张立栋, 刘若云, 王 擎, 李少华, 秦 宏

(东北电力大学 能源与动力工程学院, 吉林 132012)

摘 要:采用离散元数值模拟法对多元颗粒在不同偏心距工况下进行数值模拟,研究偏心滚筒对全部大颗粒的运动初始阶段、稳定阶段的平均速度波动的影响。结果表明:在不同偏心距的偏心滚筒中,同粒径颗粒的平均速度 波动不同;偏心滚筒中颗粒平均速度曲线在每个运动周期都会出现波峰和波谷现象,且偏心距越大,该现象越明 显;在颗粒运动的初始阶段,大粒径颗粒平均速度波动范围大,偏心距为20mm的滚筒中所有大颗粒平均速度波动范围最大;在颗粒运动的稳定阶段,随着时间的延长,粒径对于颗粒平均速度的影响不明显。

关键词: 偏心距; 大颗粒; 颗粒运动; 平均速度

文章编号: 1004-0609(2018)-10-2164-08

中图分类号:

文献标志码: A

颗粒物质由有大量离散单体固体颗粒构成的复杂 系统。颗粒物质被广泛应用于工农业生产和日常生活 中,如金属冶炼、矿物加工、药品生产、食品加工 等^[1-2]。滚筒是运输和处理颗粒物质的最常见且最重要 的设备,广泛应用在干燥冷却、热解干馏、颗粒混合 等工业生产过程中,并且颗粒物质体系在回转筒内运 动混合的状态直接影响生产的效率和工艺产品的质 量^[3]。因此,研究和掌握滚筒内颗粒物质体系的运动混 合状态规律具有重要的理论意义和工程应用价值。

正因为滚筒内颗粒物质的运动规律和混合规律在 工农业上的广泛应用,国内外的科研人员对此进行了 大量的研究。陈辉等^[4]针对物料的散体颗粒性质,采 用离散单元法建立物料的运动模式,探究一元散体颗 粒物料在回转窑截面的运动与混合,得出回转窑转速 越高,物料动能的耗散性越高。GUI等^[5-7]将滚筒壁摩 擦力对二元颗粒混合影响进行数值模拟,发现筒壁摩 擦力对于颗粒的运动产生阻力,并且抑制颗粒的混合 程度;滚筒速度决定颗粒的主动驱动的摩擦力进而加 快颗粒的运动和混合;除此之外,还发现颗粒间的大 小比例对于颗粒流整体运动及混合的影响是最小的。 还有一些科研人员探究筒形对于颗粒物质混合的影 响,例如葛良等^[8]设计波型边界的旋转滚筒,探究颗 粒的混合和导热分布形态特性,相对于圆形滚筒,波

型滚筒在较低速度下就可以达到圆型滚筒较高速度下 的混合效果,波型滚筒较圆型滚筒有更好的混合效率。 本文作者前期曾采用实验与理论分析方法,以 Lacey 混合指数作为混合评价指标,研究了转速、填充率对 椭圆型混合器内二元颗粒的径向混合,为椭圆型混合 器的生产应用提供了重要的理论依据^[9]。除针对圆型 滚筒和圆颗粒的运动混合探究,白珏明等^[10]研究通过 离散元法模拟直观获得滚筒颗粒运动状态,分析颗粒 运动的特点^[9]。张立栋等^[11]采用 DEM 方法探究变转 速下滚筒内二元颗粒的混合特性,认为最佳混合工况 下的颗粒运动都处于抛落的运动模式,且无论是匀速 还是变转速滚动,长轴筒混合效果始终优于短轴筒混 合效果。GENG 等^[12]在滚筒干燥器中对杆状颗粒特性 进行三维数值模拟,模拟结果得到颗粒的运动周期越 小,越有利于颗粒床内部的扩散和混合,并且主动层 颗粒最大速率随转速、填充率、滚筒直径的增大而增 大。王会等[13]则进行了圆锥料仓颗粒周期脉动特征研 究,以明晰颗粒脉动特征,整个卸料过程中颗粒速度 始终处于波动变换中,而且料仓的半锥角越小,卸料 速度越稳定。

滚筒中颗粒运动混合方面已经有了丰富的研究成 果可借鉴,本文作者将重点探究多元颗粒在滚筒中运 动状态和速度波动特性。

收稿日期: 2017-09-26; 修订日期: 2018-05-08

基金项目:教育部长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT_17R19); 吉林省自然科学基金资助项目(20150101033JC); 吉林市科技计划项目 (201464044)

通信作者: 张立栋, 副教授, 博士; 电话: 13843225181; E-mail: nedu1015@aliyun.com

1 模型的建立

本实验中以油页岩固体热载体干馏为应用背景, 颗粒间的接触基于软球模型简化,颗粒的接触模型采 用经典的无滑移接触模型对滚筒内的颗粒运动进行数 值模拟,将颗粒与滚筒壁面以及颗粒与颗粒之间的接 触过程简化为类似于弹簧振子的阻尼振动。

1.1 几何模型

本文作者采用 DEM(离散单元法)对滚筒内 5 种粒 径颗粒运动过程进行研究,滚筒内径为 84 mm、厚度 为 20 mm,研究滚筒几何中心偏离滚筒旋转中心的距 离 P(简称偏心距)对 4 种粒径颗粒速度脉动的影响。其中滚筒内径为 84 mm、厚度为 20 mm; 3 种偏心距分 $别为 <math>P_0=0$ mm, $P_1=10$ mm, $P_2=20$ mm;滚筒以 15 r/min 进行定速转动;转动前,转轴在颗粒体系的垂直正上 方,黑点代表滚筒转轴在径向切面的位置^[14],如图 1 所示。



图1 滚筒内颗粒初始位置及偏心距示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of initial position and eccentricity of particle in roller: (a) $P_0=0$ mm; (b) $P_1=10$ mm; (c) $P_2=20$ mm

1.2 DEM 模拟条件

模拟中滚筒的密度设置为 7800 kg/m³,弹性模量 是 1.82×10⁹ N/m²,泊松比为 0.3^[15-16],小粒径颗粒在 下大粒径颗粒在上的原则向滚筒内填充,颗粒的相关 数据见表 1。

1.3 速度脉动波动分析方法

关于滚筒内颗粒流的研究中,通常选取随机的颗 粒进行颗粒速度的探究^[17-18],但为了研究整体大颗粒 在滚筒中的运动状态,本实验中提取所有大颗粒(包括 直径为2、3、4和5mm的颗粒)的速度数据,处理之 后,进而研究大颗粒速度脉动特性。

若以 *u*_i表示滚筒内部第 *i* 个颗粒的速度, *n* 为颗 粒数,则该时刻滚筒内部所有颗粒的平均速度 *v* 为 表1 颗粒的物理参数及力学性质

 Table 1
 Physical parameters and mechanical properties of particles

Parameter	Value		
Density/(kg·m ⁻³)	1800		
Diameter	$D_1=1 \text{ mm}, D_2=2 \text{ mm}, D_3=3 \text{ mm}, D_4=4 \text{ mm}, D_5=5 \text{ mm}$		
Quality ratio	4:1:1:1:1 (from 1 mm to 5 mm)		
Modulus of elasticity/($N \cdot m^{-2}$)	2.5×10^{8}		
Poisson's ratio	0.25		
Coefficient of rolling friction	0.01		
Coefficient of static friction	0.9		
Coefficient of restitution	0.1		

$$v = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} u_i \tag{1}$$

通常采用标准差评定数据的离散程度,本实验中 采用标准差σ定量评价速度的波动程度,以表征颗粒 的脉动特性。平均速度的标准偏差的求法如下^[13]:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{\left(u_i - v\right)^2}{n}}$$
(2)

2 模拟结果与分析

滚落模式是工程实际中最常见的颗粒运动形态, 在本文中的模拟工况均为滚落模式^[19-20]。由于颗粒在 对滚筒运动的过程中从起始到结束会有不同的运动特 性,根据颗粒的运动特性,起始时颗粒的平均速度波 动频率和波动范围都具有不稳定性,而之后阶段的速 度波动频率和波动范围都逐渐稳定。本实验中将颗粒 的整个运动过程分为两个阶段单独研究,即初始阶段 (1~17 s,即平均速度的前四个周期)和稳定阶段(18 s~ 结束,即第五周期至结束),这样有利于研究整体颗粒 在运动过程中运动特性及平均速度的运动周期。

2.1 工况的初始阶段速度分析

2.1.1 同粒径颗粒平均速度在不同偏心工况下的比较分析

颗粒在滚筒中运动,活动层的颗粒在重力的作用 下随着滚筒的转动滚落至平流层的底部^[21],颗粒的平 均速度就会在每个周期内出现速度波峰与速度波谷。

图 2 所示为同粒径颗粒初始阶段平均速度比较。 由图 2 可以看出,同一粒径下,偏心距越大其平均速 度的波动范围越大,平均速度周期几乎相同,达到波 峰与波谷的频率几乎相同;偏心距越大,颗粒距旋转 中心的距离越大,则其整体颗粒的平均速度波动范围 就越大。

在图 2 所示的相同粒径颗粒初始阶段平均速度 中,同粒径不同偏心距的颗粒平均速度波峰的增长趋 势几乎相同。但是随着偏心距的增大,相邻波谷会出 现明显的速度差,且速度差随着偏心距的增大而增加。 这是因为,随着滚筒转动,大部分相同粒径颗粒在相 邻两次平流层运动过程中,颗粒体系整体位置与转轴 距离不同,相应的线速度差异较大,以至于颗粒的平 均速度出现了两个波谷的现象。以图 2(c)为例,其第 三个周期中两个波谷中较大的速度为 9.71 s 时的 0.06 m/s,较小速度为 11.34 s 时的 0.045 m/s。速度偏高的 波谷,本实验中称为大波谷,速度偏低的波谷,称为 小波谷。大波谷速度随偏心距增大而增高,依旧如图 2(c)中的第三周期,偏心距为 20 mm 的大波谷速度明 显高于偏心距为10mm的大波谷速度,偏心距为0mm的大波谷速度最低。

2.1.2 零偏心距滚筒中大颗粒平均速度分析

在偏心距为 P=0 mm 的工况下,滚筒的旋转半径 就是滚筒的半径。因为其旋转半径稳定,颗粒的运动 周期也稳定,平均速度没有大小波谷的现象存在,见 图 3(a)。

在初始阶段,2 mm 颗粒的平均速度较其他粒径的颗粒先达到波峰,其次是3 mm 颗粒,4 mm 颗粒,最后是5 mm 颗粒。这是因为启动前的颗粒位置排布顺序从上至下依次是5、4、3 和2 mm,如图1 所示。由于重力的原因,粒径大的颗粒,即质量更大的颗粒 在重力的作用下会获得更大的动能,到达滚筒的底部; 而粒径较小的颗粒则无法到达滚筒的最底部,然后粒 径较小的颗粒提前到达该周期的速度峰值,粒径较大 颗粒提前进入平流层随滚筒做圆周运动。

在 5 mm 颗粒平均速度上升的过程中,其速度几 乎呈直线上升,速度的波动较少,直接达到波峰速度 0.17 m/s。随着时间的延长,5 mm 颗粒的平均速度波 动逐渐稳定,在6 s 后其波谷速度稳定在 0.55~0.65 m/s



图 2 同粒径颗粒初始阶段的平均速度比较

Fig. 2 Average speed comparison of same size particle in initial stage: (a) 2 mm particles; (b) 3 mm particles; (c) 4 mm particles; (d) 5 mm particles





图 3 不同粒径颗粒初始阶段平均速度 比较

Fig. 3 Average speed comparison of different size particle in initial stage: (a) $P_0=0$ mm; (b) $P_1=10$ mm; (c) $P_2=20$ mm

之间,在11s后其波峰速度稳定在0.95~1.05 m/s之间。 其原因是在起始时刻,5 mm 颗粒没有和其他粒径的 颗粒混合,其他粒径粒子对其几乎没有影响,所以其 运动自由速度上升快。随着5 mm 颗粒与其他粒径颗 粒的混合,运动受其他粒径颗粒的影响,速度波动变 小,并与整体的颗粒运动周期逐渐一致。

同样在初始阶段,4 mm 颗粒的平均速度波动范 围较 5 mm 的小,其波峰速度在 4 s 后就稳定在 0.95~1.05 m/s 之间,其波谷速度在 4 s 后稳定在 0.55~0.65 m/s 之间。

3 mm 颗粒平均速度的波动范围更小,从启动开始,其波峰速度稳定在 0.85~0.95 m/s,自 11 s 后 3 mm 颗粒的波峰速度稳定在 0.90~0.95 m/s,其波谷速度在 初始阶段缓慢稳步增加,直至 11 s 后,其值稳定在 0.60~0.65 m/s。

与以上 3 种粒径颗粒的平均速度相比,2 mm 颗粒的波峰速度在初始阶段是缓慢增加的,直至到 9 s 后,其波峰速度稳定在 0.90~0.95 m/s 之间,其波谷速度也是在初始阶段缓慢增加,直至 9 s 后,其波谷速度稳定在 0.60~0.65 m/s 之间,速度波动更加平稳。

综上所述,颗粒的粒径越大,在初始阶段其速度 最大峰值越大,随着时间的延长,所有颗粒的平均速 度逐渐平稳,15 s 后所有颗粒的波峰速度稳定在 0.90~0.95 m/s; 启动后,随时间的增加,所有颗粒的 波谷速度缓慢增加,逐渐稳定,15 s 后稳定在 0.60~0.65 m/s 之间。

2.1.3 10 mm 偏心距滚筒中大颗粒平均速度分析

在10mm偏心距工况下,随着滚筒绕旋转中心旋转,滚筒的运动半径是变化的(见图3(b))。观察图3(b)所有颗粒的平均速度波动范围是趋于稳定的,5mm颗粒的波峰速度逐渐下降,从启动开始的0.12m/s到10s后稳定在0.95~1.05m/s的范围,在5s后出现明显的大小波谷,大波谷速度在7s后稳定在0.65~0.70m/s之间,其小波谷速度在初始阶段便稳定在0.55~0.60m/s之间,7s之后小波谷速度稳定在0.50~0.55m/s间。

4 mm 颗粒的波峰速度 0.15 m/s 从初始阶段开始 小幅度下降,其数值在 10 s 后稳定在 1.00~1.05 m/s 之间,其波谷速度在 5 s 后便出现了清晰的大小之分, 自 10 s 后大波谷速度稳定在 0.07 m/s 左右,小波谷速 度稳定在 0.50~0.55 m/s。

3 mm 颗粒的波峰速度稳定在 0.10~0.11 m/s 之间, 5 s 后同样出现了清晰的大小波谷,大波谷速度稳定 0.07~0.75 m/s 之间,小波谷速度则一直稳定在 0.50~0.55 m/s 之间。

2 mm 颗粒则与在偏心距为0 mm 情况下的速度趋

势相似,从启动开始其波峰速度呈缓慢增长趋势,在 9 s 后稳定在 0.90 m/s 左右,波谷速度在刚启动的阶段 比较不稳定,在 5 s 之后出现明显稳定的大小波谷之 分,大波谷速度在 0.65~0.70 m/s 之间,小波谷速度在 0.50~0.55 m/s 之间。

2.1.4 20 mm 偏心距滚筒中大颗粒平均速度分析

在偏心距是 20 mm 的工况下(见图 3(c)), 5 mm 颗 粒平均速度的波动最大,波峰速度在初始阶段波动范 围也大,这是因为在物料最初的放置 5 mm 颗粒在最 上层,滚筒开始运动 5 mm 颗粒便处于活动层,由于 重力的作用在滑落过程中获得动能。由图 3 可以看出, 5 mm 颗粒滑落的距离最大,相应地也获得更多的动 能,其平均速度最大,其次是 4 mm 颗粒, 3 mm 颗粒, 最后是 2 mm 颗粒。

在颗粒随滚筒运动的过程中,由于粒径大的颗粒 质量大,惯性也大,大粒径的颗粒较小粒径颗粒相比, 会远离涡心,贴近筒壁,获得更大的速度差(波峰速度 与波谷速度之差)。如表 2 初始阶段前 4 个周期内速度 差图像,第一个周期颗粒粒径越大其速度差越大,即 平均速度波动随颗粒粒径的增大而增大,反之亦然; 第二周期之后,不同粒径颗粒平均速度差之间的差值 变小,这是因为随着运动的进行,不同粒径颗粒开始 混合,其运动状态就会受到影响,不同粒径颗粒之间 的速度差就会越来越小。

5 mm 颗粒在 4 s 之后速度波谷出现明显的大小波 谷现象(其他粒径的颗粒也是在 4 s 之后出现这一现 象),这是因为在 4 s 后由于颗粒整体随滚筒的旋转进 入运动轨迹,5 mm 颗粒的绝大部分进入了两个转轴 距离不同的平流层,便出现了大小波谷的现象。大波 谷速度 9 s 后稳定在 0.75~0.85 m/s 之间,小波谷速度 稳定在 0.40~0.50 m/s 之间。而其波峰速度变化不大, 逐渐平稳于 12 s 稳定在 0.95~1.05 m/s 之间。

4 mm颗粒平均速度较 5 mm颗粒平均速度波动的 范围小且平稳,其波峰速度没有较大的波动,在 9 s 后便稳定在 1.00~1.05m/s 之间,大波谷速度在 9 s 后 稳定在 0.80~0.85 m/s 之间,小波谷速度稳定在 0.45~0.50 m/s 之间。3 mm颗粒与 4 mm、5 mm颗粒 相比,其平均速度波动更加平稳,波动的范围更小, 在启动开始,其波峰速度就稳定在 0.95~0.10 m/s 之间, 大波谷速度稳定在 0.40~0.50 m/s 之间,小波谷速度则 在 5 s 以后稳定在 0.80~0.85 m/s 之间。

2 mm 颗粒的平均速度波动与 3 mm、4 mm、5 mm 颗粒的整体趋势不同,在启动开始到稳定阶段,其平 均速度呈缓慢上升趋势,波峰速度和波谷速度都在缓 慢上升;波峰速度在 8 s 后逐渐稳定在 0.9~1.0 m/s 之 间,大波谷速度则在8s后稳定在0.8 m/s左右,小波 谷速度则一直缓慢增加。这是因为随滚筒开始转动, 大部分2 mm颗粒处于涡心的位置,速度变化较慢; 随着滚筒的转动,2 mm颗粒逐渐分散至滚筒的各个 位置,其颗粒的整体速度便慢慢增大,逐渐稳定。因 为在偏心距10 mm工况下,不同粒径颗粒平均速度的 变化趋势与在偏心距20 mm工况下的情形几乎相同, 只是速度变化没有那么明显,所以本文主要分析在偏 心距20 mm工况下的速度变化趋势。

表 2 20 mm 偏心距初始阶段不同粒径颗粒平均速度差比较 **Table 2** Average speed difference comparison of different size particle in initial stage with $P_2=20$ mm

Period -	$\Delta v/(\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1})$			
	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm
1	0.0861	0.0981	0.1170	0.1585
2	0.0490	0.0580	0.0674	0.0682
3	0.0463	0.0588	0.0599	0.0709
4	0.0382	0.0588	0.0639	0.0651

2.2 稳定阶段平均速度分析

2.2.1 不同偏心距下的同粒径颗粒平均速度分析

该部分分析稳定阶段平均速度的波动特性,由图 4(a)可知,偏心距为0mm时,同粒径的颗粒平均速度 波动频率是不一致的,速度波峰和速度波谷出现位置 的偏差较大;随时间的延长则速度波峰和速度波谷位 置逐渐一致,到50s左右,速度波峰和速度波谷位置 几乎相同。当偏心距为 10 和 20 mm 时,同样出现该 现象,只是偏心距为10mm时在40s左右其速度波峰 和速度波谷的位置达到一致,而偏心距为20mm时则 在 30 s 左右其速度波峰和速度波谷位置达到一致。3 种不同工况下的同粒径颗粒在到达波动频率一致后, 其平均速度的波动范围几乎相同。这是因为颗粒在随 滚筒运动的过程中,大颗粒之间会有较大的接触空隙, 小颗粒由于尺寸较小则渗透到大颗粒与大颗粒之间, 并且随着滚筒的运动,大颗粒将逐渐被小颗粒包围, 这时大小颗粒的运动会被彼此束缚, 致使所有颗粒的 速度波动频率逐渐一致,最后达到几乎相同。

由图 4(a)、(b)、(c)、(d)对比可以明显看出,不同 工况下的同粒径颗粒偏心距越大,其速度的波动范围 就越大,即 $\Delta v_{P=0 \text{ mm}} \leq \Delta v_{P=10 \text{ mm}} \leq \Delta v_{P=20 \text{ mm}}$ 。

2.2.2 同偏心距下的不同粒径颗粒平均速度分析

由图 5(a)可以看出,在同偏心距下,不同粒径颗粒的平均速度周期是比较混乱,不同粒径颗粒都有自己的运动周期,彼此之间的影响较小。平均速度的波动



图4 相同粒径颗粒稳定阶段平均速度比较

Fig. 4 Average speed comparison of same size particles in stable stage: (a) 2 mm particles; (b) 3 mm particles; (c) 4 mm particles; (d) 5 mm particles





图 5 不同粒径稳定阶段平均速度 比较

Fig. 5 Average speed comparison of different size particles in stable stage: (a) $P_0=0$ mm; (b) $P_1=10$ mm; (c) $P_2=20$ mm 在 0.60~0.90 m/s 范围内时,这种现象一直持续。

如图 5(b)所示,在偏心距为 10 mm 的工况下,不同粒径颗粒的平均速度运动周期开始逐渐一致,随着时间的延长,颗粒的平均速度周期明显一致,并且大致稳定在 0.60~0.90 m/s 之间。随着偏心距的增加,这种现象越明显。

在偏心距为 20 mm 的工况下,颗粒的平均速度周 期明显比其他两种工况下的要统一得多,并且其平均 速度的波动范围为 0.05~0.10 m/s,明显大于前两种工 况时的。这是因为随偏心距的增大,颗粒受滚筒的影 响也增加,所有颗粒在偏心滚筒中随滚筒的转动而运 动,所以整体颗粒的平均速度波动周期逐渐一致。

图 6 所示为所有颗粒在整个运动阶段平均速度的标准差。由图 6 可以发现,随着颗粒粒径的增大,其平均速度标准差也是呈增加的趋势。比较相同粒径颗粒在不同偏心距滚筒中的平均速度标准差可知,偏心距为 20 mm 的大于偏心距为 0 mm 的大于偏心距为 10 mm 的。





3 结论

 在不同偏心距工况下,相同粒径颗粒的平均速 度波动不同,其平均速度曲线在每个运动周期内会出 现波峰和波谷现象,且偏心距越大,平均速度的波动 范围就越大。

 2) 在颗粒运动的初始阶段,粒径越大,颗粒平均 速度曲线波动范围越大;偏心距越大,颗粒平均速度 波动范围越大。

3) 在颗粒运动的稳定阶段,随时间的延长,粒径

对于颗粒平均速度影响不大;偏心距为 20 mm 时颗粒 平均速度的波动范围最大。

REFERENCES

- ISABEL F, VARGAS W L, MCCARTAHY J J. Mixing and heat conduction in rotating tumblers[J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(2): 1045–1054.
- [2] TADA E F R, GRAJALES L M, LEMOS Y P, THOMEO J C. Mixture and motion of sugar cane bagasse in a rotating drum[J]. Powder Technology, 2017, 317: 301–309.
- [3] 李少华,张立栋,张 轩,余侃胜,王 擎,郝万军.回转式 干馏炉内影响颗粒混合运动因素的数值分析[J].中国电机工 程学报,2011,31(2):32-38.

LI Shao-hua, ZHANG Li-dong, ZHANG Xuan, YU Kan-sheng, WANG Qing, HAO Wan-jun. Numerical analysis of particle mixing and movement in rotary retorting[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(2): 32–38.

- [4] 陈 辉, 刘义伦, 赵先琼, 肖友刚, 刘 颖. 一元散体物料在 回转窑截面上的运动和混合[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(5): 2575-2581.
 CHEN Hui, LIU Yi-lun, ZHAO Xian-qiong, XIAO You-gang, LIU Ying. Motion and mixing of mono-disperse granular material in cross section of rotary kiln[J]. The Chinese Journal of
- [5] ZHANG Z W, GUI N, GE L, LI Z L. Numerical study of mixing of binary-sized particles in rotating tumblers on the effects of end-walls and size ratios[J]. Powder Technology, 2016, 314: 164–174.

Nonferrous Metals, 2015, 25(5): 2575-2581.

- [6] AISSA A A, DUCHESNE C, RODRIGUE D. Effect of friction coefficient and density on mixing particles in the rolling regime[J]. Powder Technology, 2010, 212: 340–347.
- [7] GENG F, LI Y M, YUAN L J, LIU M, WANG X Y, YUAN Z L,YAN Y-M, LUO D S. Experimental study on the space time of flexible filamentous particles in a rotary dryer[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2011, 44: 708–715.
- [8] 葛 良,桂 南,徐文凯,闫 洁.波形滚筒内颗粒混合和导热分布形态特性的研究[J].中国科学,2014,44(1):62-70.
 GE Liang, GUI Nan, XU Wen-kai, YAN Jie. Numerical study of the distribution characteristics on particle mixing and thermal conduction in wavy drum[J]. Science China, 2014, 44(1): 62-70.
- [9] 张立栋,李连好,王 擎,秦 宏,李少华. 椭圆形混合型内 二元颗粒径向混合[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(4): 825-832.

ZHANG Li-dong, LI Lian-hao, WANG Qing, QIN Hong, LI Shao-hua. Transverse mixing of binary granular in elliptical mixer[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(4): 825–832.

 [10] 白珏明, 刘柏谦, 白珏莹, 谭培来. 滚筒冷凝器内颗粒床运动 状态的离散单元法模拟[J]. 热力发电, 2016, 45(2): 75-85.
 BAI Jue-yu, LIU Bo-qian, BAI Jue-ying, TAN Pei-lai. DEM simulations of solid motion in rotary drum ash cooler[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(2): 75-85.

- [11] 张立栋,程 硕,李少华,王 擎. 变转速回转筒内二元颗粒 混合特性数值分析[J]. 东北电力大学学报, 2018, 38(3): 39-45. ZHANG Li-dong, CHENG Suo, LI Shao-hua, WANG Qing. Numerical simulation study on the mixing characteristics of the binary particle in a variable speed rotating device[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2018, 38(3): 39-45.
- [12] GENG F, GANG L Y, WANG Y C, LI Y M, YUAN Z L. Numerical investigation on particle mixing in a ball mill[J]. Powder Technology, 2015, 292: 64–73.
- [13] 王 会, 贾富国, 韩燕龙, 张亚雄, 曹 斌. 圆锥料仓内颗粒 周期性脉动特征研究[J]. 物理学报, 2016, 66(1): 192-202.
 WANG Hui, JIA Fu-guo, HAN Yan-long, ZHANG Ya-xiong, CAO Bin. Cyclical pulsation properties of particles in cone sile[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 66(1): 192-202.
- [14] 张立栋,李连好,秦 宏,王 擎. 多粒径颗粒在圆形偏心滚 筒内的运动混合[J]. 化工进展, 2017, 36(2): 451-456. ZHANG Li-dong, LI Lian-hao, QIN Hong, WANG Qing. Research on the motion and mixing of polydisperse particles in a circular eccentric drum[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(2): 451-456.
- [15] BASINSKAS G, SAKA M. Numerical study of the mixing efficiency of a batch mixer using the discrete element method[J]. Powder Technology, 2016, 301: 815–829.

- [16] SANTOS D A, BARROZO M A S, DUARTE C R, WEIGLER F, MELLMANN J. Investigation of particle dynamics in a rotary drum by means of experiments and numerical simulations using DEM[J]. Advanced Powder Technology, 2016, 27: 692–703.
- [17] HASSANPOUR A, TAN H, BAYLY A, GOPALKRIDHNAN P, NG B, ALI M G. Analysis of particle motion in a paddle mixer using discrete element method (DEM)[J]. Powder Technology, 2010, 206: 189–194.
- [18] GUI N, YANG X T, TU J Y, JIANG S Y. Effect of roundness on the discharge flow of granular particles[J]. Powder Technology, 2016, 314: 140–147.
- [19] HALIDAN M, CHANDRATILLEKE G R, CHAN S L I, YU A B, BRIDGWATER J. Prediction of the mixing behaviour of binary mixtures of particles in a bladed mixer[J]. Chemical Engineering Science, 2014, 120: 38–48.
- [20] PASHA M, HASSANPOUR A, AHMADIAN H, TANC H S, BAYLY A, GHADIRI M. A comparative analysis of particle tracking in a mixer by discrete element method and positron emission particle tracking[J]. Powder Technology, 2015, 270: 569–574.
- [21] YANG R Y, ZOU R P, YU A B. Microdynamic analysis of particle flow in a horizontal rotating drum[J]. Powder Technology, 2003, 130: 138–146.

Pulsation characteristics of larger particle average velocity in different eccentric rollers

ZHANG Li-dong, LIU Ruo-yun, WANG Qing, LI Shao-hua, QIN Hong

(School of Energy and Power Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: A numerical study on multiple particles under different eccentric conditions by DEM(Discrete element method) was presented. The aim is to research the influence of average speed fluctuation of larger particles by the eccentric rollers in initial and stable stages. The results show that the particles with the same size have different fluctuations of average velocity in different eccentric rollers; the average speed curves of particles in eccentric cylinder appear the peaks and troughs in a motion period, and greater eccentric rollers arise more obvious phenomenon. At the initial stage, bigger size particles have a wide range of average velocity fluctuation, the average speeds of all particles have the widest range in the 20 mm eccentricity drum. At the stable stage, the sizes of particles have no obvious impact on the average speed of particles when the particle movement gradually become stable.

Key words: eccentricity; large particle; particle motion; average velocity

Received date: 2017-09-26; Accepted date: 2018-05-08

Corresponding author: ZHANG Li-dong; Tel: +86-13843225181; E-mail: nedu1015@aliyun.com

Foundation item: Project(IRT17R19) supported by Program of Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University, China; Project(20150101033JC) supported by the Natural Science Foundation of Jilin Province, China; Project(201464044) supported by the Science and Technology Development Projects of Jilin City, China