

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2018.05.004

基于离散元法回转清理筛运动参数对筛分过程的影响分析

张盼盼^{1,4}, 阮竞兰^{1,2}, 王豪东¹, 孙慧男³, 杨丽彦¹

(1. 河南工业大学 机电工程学院, 河南 郑州 450007; 2. 国家粮食加工装备工程技术研究中心, 河南开封 475200; 3. 郑州中粮科研设计院有限公司, 河南 郑州 450000; 4. 北方易初摩托车有限公司, 河南 洛阳 471000)

摘要:以 HZZD 型回转清理筛为原形, 建立了离散元仿真筛分模型, 借助离散元分析软件 EDEM, 通过改变清理筛运动参数, 分析影响物料平均推进速度和筛分效率的因素, 以获得最佳运动参数。分析结果显示, 对颗粒群平均推进速度的影响水平: 筛体回转半径>转速>筛面倾角; 为达到较好的筛分效果, 筛体回转半径、转速和筛面倾角宜取为 20 mm、450 r/min、6°~8°。

关键词:离散元法; 回转清理筛; 筛分效率; 平均推进速度

中图分类号: TS 211.3 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2018)05-0017-07

The influence analysis of movement parameters of rotary cleaning screen on screening process based on discrete element method

ZHANG Pan-pan^{1,4}, RUAN Jing-lan^{1,2}, WANG Hao-dong¹, SUN Hui-nan³, YANG Li-yan¹

(1. School of Mechanical & Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou Henan 450007; 2. National Engineering Research Center for Grain Processing Equipment, Kaifeng Henan 475200; 3. COFCO Research & Engineering (Zhengzhou)co., Ltd, Zhengzhou Henan 450000; 4. Dayang Motorcycle, Luoyang Henan 471000.)

Abstract: The HZZD rotary cleaning screen was used as the prototype to establish the simulation screening system model. To obtain the best motion parameters, the discrete element analysis software EDEM was used to analyze the factors affecting the average propelling speed of the particles and the screening efficiency by changing the parameters of the cleaning screen. The analysis results showed that the order of the influence of the factors on the average propelling speed of the particle group was: radius of gyration of the sieve> rotating speed> inclined angle of the sieve surface; To achieve a better screening effect, the radius of gyration should be taken as 20 mm, the rotating speed as 450 r/min and the inclined angle of the sieve surface as 6° to 8°.

Key words: discrete element method; rotary cleaning screen; screening efficiency; average propelling speed

在振动筛分领域, 物料主要以粉体和散体形式存在, 统称为颗粒材料, 研究颗粒材料的运动情况有助于对现有筛分设备进行优化和改进。目前通过离散单元法(discrete element method, DEM)

研究散体颗粒堆积的过程能有效模拟物料力学参数、颗粒接触模型变化时对散体运动特性的影响情况^[1]。与颗粒物质的连续介质理论相比, 利用 DEM 模拟能够得到物理实验难以测得的微观数据, 可帮助深入理解颗粒物质行为机理, 完善和改进现有理论, 从而更好地解决实际问题^[2]。

在回转筛面的优化设计中, 基于离散元法对筛分过程进行仿真分析还较少。对于被筛物料,

收稿日期: 2018-04-13

基金项目: 开封市重点科技计划项目(ZD16010), 国家“十三五”重点研发计划(2017YFD0401101-01)

作者简介: 张盼盼, 1992 年出生, 男, 硕士研究生。

通讯作者: 阮竞兰, 1958 年出生, 女, 教授。

筛面的运动参数(回转半径、转速、筛面倾角)不同,物料运动将消耗的能量也不同,对筛分效果均会产生不同程度的影响^[2-4]。物料颗粒在筛面上的推进速度及透筛规律,对回转清理筛的处理量和筛分效率影响很大。因此,本研究讨论了筛面运动参数的改变对颗粒群在回转清理筛面上的平均推进速度和筛分效率的影响,以期对回转清理筛样机后续的优化改进提供理论依据。

1 初始设置和数值实验方法

1.1 建立筛面离散元仿真筛分模型

EDEM 中的默认坐标系与导入模型坐标系一致,因此,在三维软件 SolidWorks 中建模时将原点设置在筛面的中间位置,设置 Z 轴正向垂直于筛面向上方向,筛面与 XOY 面重合,落料箱到出口方向为 X 轴的正向。为了后续分析的需要,在 EDEM 中改变重力在各个方向的分量,模拟实际中筛面的倾斜角度。设置颗粒工厂尺寸小于落料箱的长和宽各一个回转直径,避免颗粒下落过程中筛箱的运动导致的颗粒飞溅和生成颗粒落入其他下料口。如图 1 所示。

1.2 仿真设置

1.2.1 筛箱运动的设置

以 HZZD 系列回转清理筛样机为原型,工作时,筛体做逆时针方向的平面回转运动,回转半径为 15 mm,转速为 300 r/min,故其运动可设置

为沿筛面 X 轴方向的正弦运动和 Y 轴方向余弦运动的叠加。即:

$$s_x = 15 \times \sin(10 \times \pi \times t) \quad (1)$$

$$s_y = -15 \times \sin(10 \times \pi \times t + \pi/2) \quad (2)$$

在 EDEM 添加两个方向上的运动,即可实现模拟筛体的平面回转运动。由于 8 层筛面的运动情况相同,为简化计算,本次分析中只建立单层筛面筛分模型。

1.2.2 仿真颗粒的设置

形状对颗粒的运动会产生较大的影响,通过实际测量得知,小麦的平均长轴长约为 6.8 mm,平均短轴长约为 3.4 mm。为尽量接近真实情况,本次分析建立七球颗粒模型,仿真实际中的小麦颗粒。

本次分析选择研究回转清理筛下层筛的筛分情况。由于下层筛主要是去除灰尘、物料颗粒碎末、碎小石块等小杂,本次仿真分析需建立四种颗粒模型,分别是模拟真实小麦的七球小麦颗粒模型,用单个圆球模型仿真灰尘、颗粒碎末,四球颗粒石块模型和三球石块颗粒模型仿真模拟碎小石块的不同形态。设置小杂颗粒的尺寸小于筛孔尺寸,保证杂质可以透筛。为不同颗粒设置对应的颗粒工厂,保证颗粒在落料箱内落下,且避免落入其他落料口。本分析共设置 5 000 颗仿真颗粒,具体设置颗粒数和生成速率见表 1。

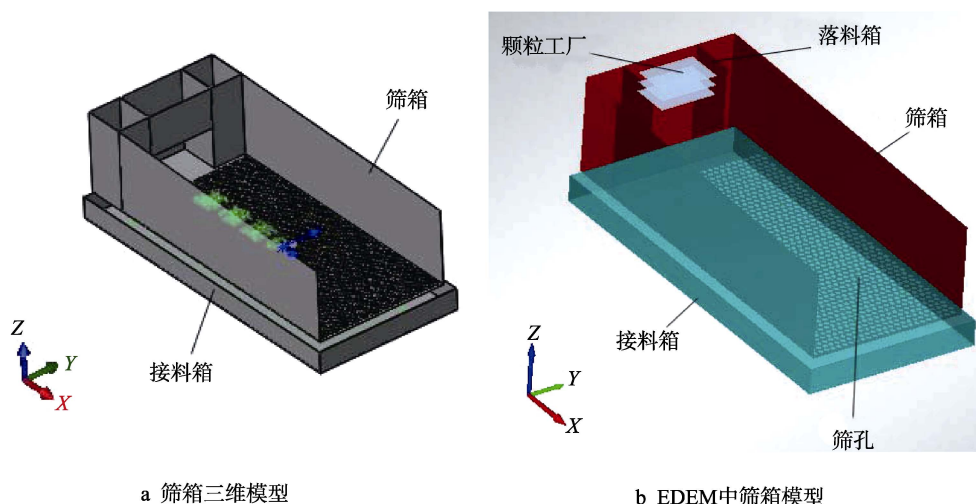


图 1 筛箱模型

表 1 颗粒初始参数设置

颗粒类型	工厂类型	颗粒总数/颗	生成速率/(颗/s)	最大尝试次数/次	开始时间/s
小麦颗粒	dynamic	4 000	5 000	20	$1e^{-12}$
碎末颗粒	dynamic	400	5 000	20	$1e^{-12}$
块状石块	dynamic	400	5 000	20	$1e^{-12}$
三角石块	dynamic	200	5 000	20	$1e^{-12}$

1.3 数值实验方法

由于分析因素中的变量较多,在分析过程中,采用单因素法,分别讨论回转清理筛筛体回转半径、转速、筛面倾角的改变对颗粒群平均推进速度和筛分效率的影响,根据实际情况,选择合适的回转清理筛运动参数,针对三种运动参数,在每一水平上,设置 4 个水平的仿真模拟实验,避免其他参数对筛分过程的影响。具体实验数据设置如表 2 所示。

表 2 回转清理筛筛分过程数值实验设计

因素	水平			
筛面倾角/°	2	4	6	8
回转半径/mm	10	15	20	25
转速/(r/min)	200	300	450	600

1.4 数据统计方法

在筛分作业过程中,筛分效率是综合反映筛分质量的一个重要指标^[5-6],为了便于表示不同的运动参数对筛分效率的影响,分别统计达到稳定筛分状态时筛上物中所含杂质数量和物料中所含的杂质总数,计算达到稳定筛分状态时的筛分率^[6],其计算式为:

$$\eta_{\text{总}} = \frac{n_{\text{下}}}{n_{\text{总}}} = 1 - \frac{n_{\text{上}}}{n_{\text{总}}}$$

(3)

式中, $\eta_{\text{总}}$ 表示达到稳定筛分状态时的筛分效率,%; $n_{\text{总}}$ 表示物料中所含的杂质总数,颗; $n_{\text{上}}$ 表示达到稳定筛分状态时筛上物所含的杂质数量,颗; $n_{\text{下}}$ 表示达到稳定筛分状态时筛过物数量,颗。选择合适的筛孔,小麦颗粒将不能透筛,达到稳定筛分状态时筛过物数量等于达到稳定筛分状态时筛下物所含的杂质数量。

在实际筛分作业中,物料一般要经历入料-输

送(透筛)-排料等动态过程,筛分效率也会随着时间的改变而发生动态改变,为了探究不同时刻的物料筛分效率的变化情况,本次分析规定动态筛分效率的计算式为:

$$\eta_t = \frac{B_t}{A_t}$$

(4)

式中, η_t 表示 t 时刻的筛分效率,%; A_t 表示 t 时刻计算域中的所有杂质颗粒数,颗; B_t 表示 t 时刻透筛的杂质颗粒数,颗。

物料颗粒在筛面的运行时间决定了回转清理筛的产量。在有倾角的回转筛面上,群体颗粒的运动较复杂,本次分析,做简化处理,选择最先到达排料端的物料颗粒为研究对象,通过分析其随筛面运行位置的变化,将其从产生到运动到排料端的距离与时间的比值定义为颗粒群在筛面上的平均推进速度,研究筛面运动参数的改变对筛分过程的影响,以期寻找合适的筛面运动参数。

$$v = s / t$$

(5)

式中, v 为颗粒物料在筛面上的推进速度,m/s; s 为颗粒物料在筛面上的移动距离,m; t 表示颗粒物料在筛面上移动距离 s 经历的时间, s 。

统计各组实验数据,采用 Excel 和 Origin 软件进行数据分析。

2 筛分效率和颗粒推进速度的分析

2.1 筛面运动参数对颗粒沿筛面平均推进速度的影响数值模拟实验分析

筛分过程中,同种颗粒之间、异种颗粒之间、颗粒与筛面之间接触时会产生力的作用,对颗粒的运动状态会产生极大的影响,颗粒群中颗粒的运动具有较大的随机性。颗粒与筛面、颗粒与颗粒之间产生了相对运动,颗粒群呈现类流体的复

杂运动状态,从宏观上看,颗粒群沿筛面由落料端向排料端产生流动运动^[2]。物料颗粒沿筛面的推进速度直接影响清理筛的筛分效率和处理能力。研究清理筛运动参数对物料颗粒推进速度的影响具有实际意义。

通过预实验发现,当颗粒运动到距离落料口 1 000 mm 时,5 000 颗颗粒平铺在筛面上,落料口没有落料堆积,筛分达到稳定状态。由于最先到达距离落料口 1 000 mm 的颗粒是颗粒群中运动最快的颗粒,其推进速度要比颗粒群的平均推进速度要大,这是颗粒群能达到的最大推进速度,可以用来反映运动参数对颗粒群推进速度的影响。在各分析实验中统一选择此种情况,可简化分析难度,排除颗粒的选择对分析结果的影响。因此,本次分析针对所有分析实验统一选择颗粒最快到达距离落料口 1 000 mm 时经历的时间作为本次分析的时间历程,来分析颗粒群的平均推进速度。

在 EDEM 中,改变数值实验参数,进行仿真分析。根据 1.4 中的分析,由于群体颗粒运动情况的复杂性,选择最先到达排料端的物料颗粒为研究对象,统计其从产生到运动到排料端的距离和时间,带入式 1.5 中,计算得到物料的平均推进速度。其他组实验均选择同种标准,统计记录各实验组物料的平均推进速度,数值分析结果如图 2、图 3、图 4 所示。

对上述数值分析结果进行回归分析,可以得到筛面倾角、筛分机的回转半径、筛分机转速与稳

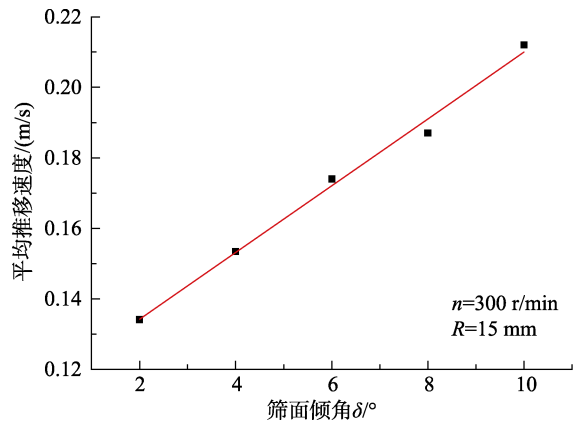


图 2 筛面倾角对颗粒平均推进速度的影响

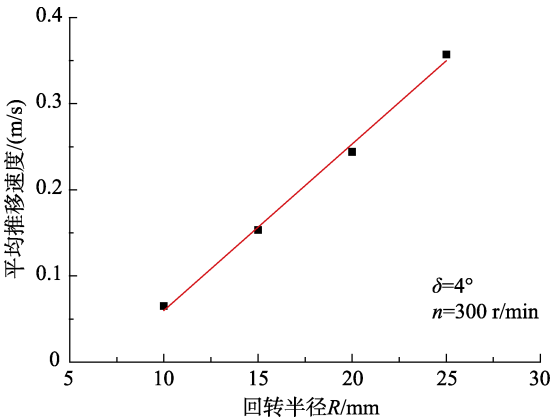


图 3 回转半径对颗粒平均推进速度的影响

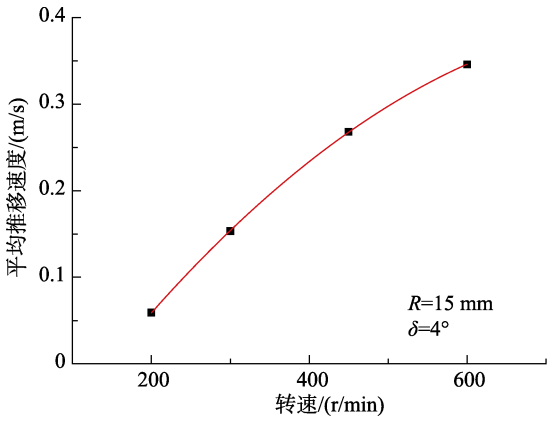


图 4 转速对颗粒平均推进速度的影响

态筛分时颗粒群平均推进速度关系的拟合方程：

$$v = 0.00947\delta + 0.11528 \tag{6}$$

$$v = 0.01933R - 0.13346 \tag{7}$$

$$v = -7.16082E - 7n^2 + 0.00134n - 0.17835 \tag{8}$$

对拟合方程进行方差分析。

表 3 式 3.1 方差分析

方差来源	自由度	平方和	均方	F	显著性
回归分析	1	0.003 59	0.003 59	446.841	2.315E-4
残差	2	2.408E-5	8.028E-6		R ² =0.991 1
总计	3	0.003 61			

表 4 式 3.2 方差分析

方差来源	自由度	平方和	均方	F	显著性
回归分析	1	0.046 72	0.046 72	544.181	0.001 83
残差	2	1.717E-4	8.585E-5		R ² =0.994 5
总计	3	0.046 89			

表 5 式 3.3 方差分析

方差来源	自由度	平方和	均方	F	显著性
回归分析	1	0.047 82	0.023 91	41 311.926	0.003 48
残差	2	5.787E-7	5.787E-7		R ² =0.999 9
总计	3	0.047 82			

对各拟合方程进行显著性分析, 检验结果显示, 拟合结果的决定系数 R^2 均大于 0.99, 回归效果显著, 曲线拟合效果较好。

结合数值分析结果和拟合曲线可知, 改变筛体的回转半径对物料群平均推进速度的影响最为显著。对物料群平均推进速度的影响水平: 回转半径 > 转速 > 筛面倾角。筛面倾角越大, 颗粒平均推进速度越大, 两者呈近似线性关系。这是由于筛面倾角越大, 颗粒所受重力沿垂直于筛面方向的分力变小, 而平行于筛面方向的分力变大, 摩擦力变小, 导致颗粒群下行轨迹变大, 上行距离减小, 导致颗粒的推进速度增大, 仿真结果与实际分析相符。筛体回转半径和颗粒群的平均推进速度也呈近似的线性关系, 其对颗粒群平均推进速度影响比改变筛面倾角更为明显。颗粒群的平均推进速度与筛体转速间为非线性关系。结合拟合曲线可知, 在一定范围内增大转速, 颗粒群的平均推进速度随着增大, 当转速大于 450 r/min 后, 再改变转速, 颗粒群的平均推进速度变化放缓。

2.2 筛面运动参数对筛分效率影响的数值模拟实验分析

为定量考察筛面运动参数对筛分过程的影响, 本次采用达到稳定筛分状态时的筛分率作为衡量筛分效果的指标, 通过统计达到稳定筛分状态时筛上物中所含杂质数量和物料中所含的杂质总数, 计算达到稳定筛分状态时的筛分率。统计数据如图 5、图 6、图 7 所示。

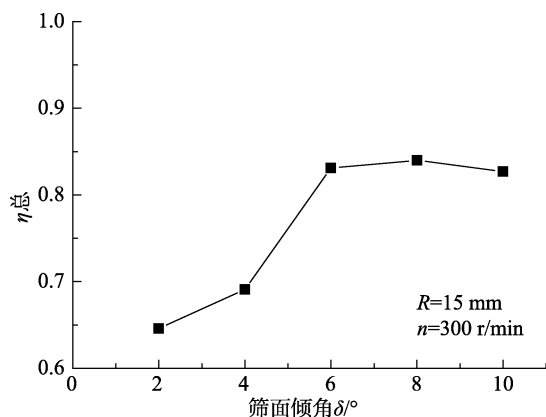


图 5 筛面倾角对筛分效率的影响

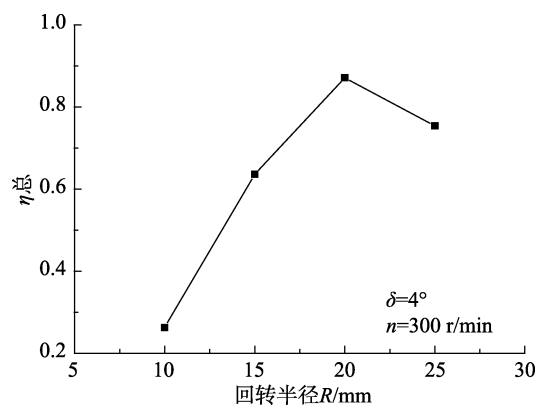


图 6 回转半径对筛分效率的影响

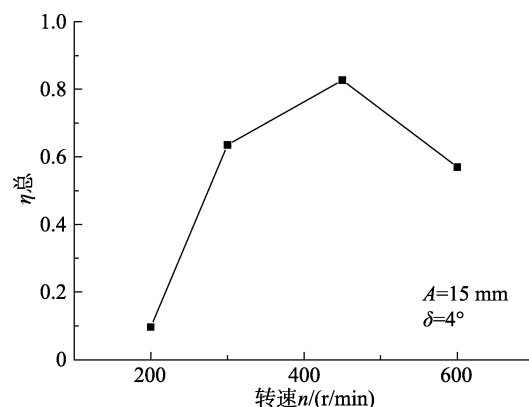


图 7 转速对筛分效率的影响

由数值分析结果可知, 在回转半径和转速不变的条件下, 当筛面倾角小于 8° 时, 随着筛面倾角 δ 的增大, 稳态筛分效率增长变缓; 当 δ 增大至 10° 时, 稳态筛分效率相较筛面倾角 8° 时有所减小, 这是由于颗粒群的平均推进速度增大, 颗粒与筛孔的接触机会减少, 从而导致了筛分效率的降低。

在回转半径和筛面倾角不变的条件下, 当筛体转速 $n < 450 \text{ r/min}$ 时, 筛分效率随着转速的增大而增大; 但当转速 n 增大到 600 r/min 时, 稳态筛分效率反而出现了减小。转速和稳态筛分效率并非线性关系, 转速过大, 筛分效率并不会提高。由仿真分析数据可知, 当转速为 200 r/min 时, 筛分效率仅为 9.7% , 筛分几乎不能进行。通过对单颗粒小麦的理论分析^[7]可知, 物料上行的最小转速为 234 r/min , 转速 200 r/min 小于物料向筛面上方运动时的筛面转速, 不能顺利进行筛分作业, 说明仿真结果和理论分析较为吻合。

其他参数保持不变,仅改变筛体的回转半径 R ,数值分析结果显示,当 $R=10\text{ mm}$ 时,筛分效率最低,仅为 26.3%;继续增加回转半径,稳态筛分效率明显增加;但当筛体的回转半径由 20 mm 增大到 25 mm 时,筛分效率出现降低,仅为 75.4%,降低了约 12%。说明过度的增大筛面的回转半径并不能总是提高稳态筛分效率。

结合已有的有关运动参数对筛分过程的影响规律^[2-3],本次分析结果与其分析规律一致,本次分析可以较好反映回转清理筛的筛分效果,EDEM 对回转清理筛筛分过程进行数值模拟具有一定的可靠性。

2.3 筛面运动参数对动态筛分效率的影响数值模拟实验分析

统计每一时刻落到筛面下和筛面上留存的除小麦颗粒外的物料颗粒,计算动态筛分效率,记录数据如图 8、图 9、图 10 所示。

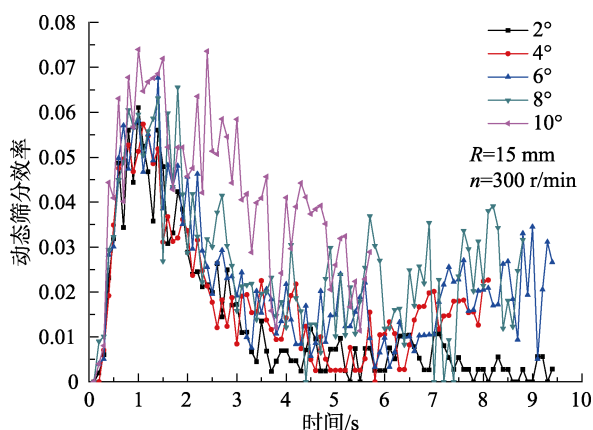


图 8 筛面倾角对动态筛分效率的影响

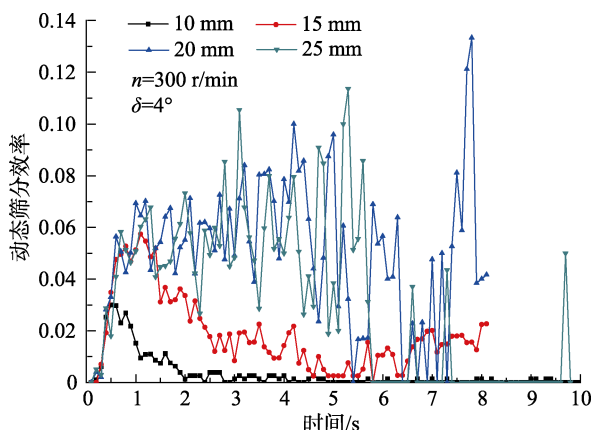


图 9 回转半径对动态筛分效率的影响

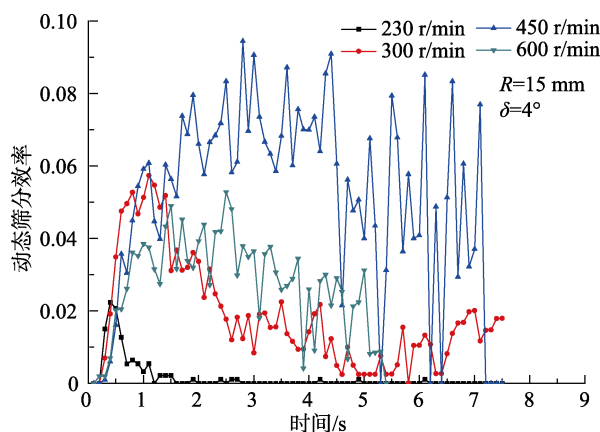


图 10 转速对动态筛分效率的影响

由图 8 可知,在筛分初始阶段,改变筛面倾角,对动态筛分效率的影响较小,这是由于物料处于产生阶段,且大部分在落料箱内堆积,还没有在筛面上散开;随着筛分的进行,物料颗粒群在筛面上散开分层,动态筛分效率趋于稳定,随着筛面倾角增大,同一时刻的动态筛分效率提高;随着颗粒群运动到排料口,筛面上开始有物料颗粒排出筛面,筛面上颗粒群数量减少,物料层变薄,小尺寸颗粒有更多机会接触筛面,完成透筛行为,动态筛分效率提高。筛面倾角越大,动态筛分效率增大的时间提前,当筛面倾角为 6°和 8°的动态筛分效率变化规律基本一致,且相较于 2°和 4°,动态筛分效率较大。在筛分初始阶段,筛面倾角为 10°时的动态筛分效率较高,在稳态筛分阶段和后续的排料阶段,其值小于筛面倾角为 6°和 8°的动态筛分效率。这与对稳态筛分效率的分析结果是一致的。

由图 9 可知,当回转半径取值为 20~25 mm 时,动态筛分效率较高,明显大于回转半径取值为 10~15 mm 的情况。且当回转半径取值为 20 mm 和 25 mm 时,动态筛分效率的变化规律基本一致,但从平均值上看,回转半径取值为 20 mm 时,动态筛分效率较高。这与对稳态筛分效率的分析结果一致。

由图 10 可知,转速取值为 450 r/min 时的动态筛分效率明显高于其他转速取值,转速为 300 r/min 和 600 r/min 时的动态筛分效率变化规律与取值

较为接近。当转速为 200 r/min, 动态筛分效率接近于 0, 几乎不能进行筛分作业。

综合三种筛面运动参数的改变的数值分析结果, 对动态筛分效率的影响水平: 转速>回转半径>筛面倾角。相较于改变筛面的回转半径和转速, 改变筛面倾角对动态筛分效率的影响最小。改变筛面转速和回转半径, 对动态筛分效率具有较大影响, 从均值变化上来看, 两者对动态筛分效率的影响水平相差不多, 回转半径选择 20 mm 和转速选择 450 r/min, 动态筛分效率均较同组其他实验提高。

3 结论

基于三维离散元法, 研究了回转清理筛回转半径、筛面倾角、筛面转速在单影响因素下对筛分系统群体物料的平均推进速度和筛分效率的影响, 得出以下结论。

在回转清理筛正常的工作范围内, 改变筛面运动参数对颗粒群平均推进速度的影响水平: 回转半径>转速>筛面倾角。筛面倾角越大, 颗粒平均推进速度越大, 两者呈近似线性关系。筛体的回转半径和颗粒群的平均推进速度也呈近似的线性关系, 其对颗粒群平均推进速度影响比改变筛面倾角更为明显。颗粒群的平均推进速度与筛体转速间为非线性关系, 在一定范围内增大转速, 颗粒群的平均推进速度随着增大, 当转速大于 450 r/min 后, 再改变转速, 颗粒群的平均推进速度变化放缓。

在回转清理筛正常的工作范围内, 筛体回转半径、转速、筛面倾角对稳态筛分效率均有较大影响, 过度增大这些参数并不能一直增大筛分效率; 改变筛面运动参数对动态筛分效率的影响水平: 转速>回转半径>筛面倾角。为达到较好的筛分效果, 筛体回转半径、转速和筛面倾角宜取为 20 mm、450 r/min、6°~8°。

参考文献:

- [1] 刘凡一, 张舰, 李博, 陈军. 基于堆积实验的小麦离散元参数分析及标定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 247-253.
- [2] 赵啦啦. 振动筛分过程的三维离散元法模拟研究[D]. 中国矿业大学, 2010.
- [3] 刘琼. 三自由度混联振动筛及颗粒群运动规律研究[D]. 安徽理工大学, 2016.
- [4] 吴永兴. 组合振动筛的参数优化及筛面颗粒运动仿真分析[D]. 江西理工大学, 2015.
- [5] 焦红光. 筛面上颗粒运动的计算机仿真研究及试验验证[J]. 矿冶, 2006, 15(1): 63-68.
- [6] 沈有柏, 李耀明, 赵湛, 杨晓彬. 颗粒物料在三自由度振动筛面上的运动仿真[J]. 农机化研究, 2010, 32(2): 21-23.
- [7] 阮竞兰, 武文斌. 粮食机械原理及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017. 6

2019 年《食品与发酵工业》征订启事

邮发代号: 2-331 (月刊)

《食品与发酵工业》, 创刊于 1970 年, 由中国轻工业联合会主管, 中国食品发酵工业研究院、全国食品与发酵工业信息中心主办。

《食品与发酵工业》是北大中文核心期刊、科技部中国科技核心期刊和中科院中国科学引文数据库(CSCD)核心期刊, 被美国化学文摘(CA)、英国食品科技及工艺文摘(FSTA)等数据库收录。

刊载内容: 食品与发酵工业相关的原辅料、工艺、包装、机械、检测、安全、流通、综合利用等方面的研究报告以及国内外食品与发酵科技发展动态和产业创新等综述性文章。

定价: 50 元/期, 在编辑部订阅全年享 8 折优惠。

地址: 北京市朝阳区酒仙桥中路24号院6号楼111室

电话: 010-53218337/8/9

邮编: 100015

E-mail: ffeo@vip.sina.com

http://sf1970.cnif.cn

国内统一刊号: CN11-1802/TS

国际标准刊号: ISSN0253-990X

广告发布登记号: 京朝工商广登字第20170155号

