

# 全封闭带式输送机返料装置 返料性能仿真试验研究

王中营<sup>1,2</sup>, 原富林<sup>2,3</sup>, 王凤成<sup>2,4</sup>, 孙慧男<sup>5</sup>

(1. 河南工业大学机电工程学院, 郑州 450001; 2. 国家粮食加工装备工程技术研究中心, 河南 开封 475200;  
3. 河南茂盛机械制造有限公司, 河南 开封 475200; 4. 河南工业大学粮油食品学院, 郑州 450001;  
5. 郑州中粮科研设计院有限公司, 郑州 450053)

**摘要:**为揭示小麦颗粒在全封闭带式输送机返料装置中的运动规律和返料性能,为返料装置的结构优化提供理论指导,开展了全封闭带式输送机返料装置返料性能仿真试验。采用离散元软件 EDEM 和 Hertz - Mindlin 颗粒接触模型建立了多球元叠加小麦颗粒模型和返料装置离散元仿真模型,对小麦颗粒群在返料板作用下的运动规律进行研究;以颗粒返回率为评价指标,返料板倾斜角、带速为考察指标进行二因素四水平仿真正交试验。结果表明:颗粒群在返料板的推动作用下呈现 4 种运动方式;返料板倾斜角是影响评价指标的主要因素,带速是次要因素;返料板倾斜角 0°和带速 3.5 m/s 为最优组合参数,此条件下颗粒返回率为 43.76%;较小返料板倾斜角有利于返料板携带更多的颗粒和减缓改向滚筒底部颗粒堆积;颗粒返回率与带速呈正相关关系,较高带速可以提高颗粒返回率。研究结果揭示了返料装置返料机理以及返料性能的影响规律,可为返料装置的结构优化提供理论指导。

**关键词:**带式输送机;返料装置;返料性能;离散元法;EDEM

中图分类号:TS223;TQ643

文献标识码:A

文章编号:1003-7969(2020)09-0112-07

## Simulation test of returning performance of returning device for fully enclosed belt conveyor

WANG Zhongying<sup>1,2</sup>, YUAN Fulin<sup>2,3</sup>, WANG Fengcheng<sup>2,4</sup>, SUN Huinan<sup>5</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. National Grain Processing Equipment Engineering Technology and Research Center, Kaifeng 475200, Henan, China; 3. Henan Maosheng Machinery Manufacturing Co., Ltd., Kaifeng 475200, Henan, China; 4. College of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 5. COFCO Research & Engineering (Zhengzhou) Co., Ltd., Zhengzhou 450053, China)

**Abstract:** In order to reveal the motion law and the returning performance of wheat granules in the returning device for fully enclosed belt conveyor, and to provide theoretical guidance for structural optimization of the returning device, the simulation test of returning performance of returning device for fully enclosed belt conveyor was carried out. A multi-sphere superimposed wheat particle model and a

discrete element simulation model of the returning device for the belt conveyor were established by using the discrete element software EDEM and Hertz - Mindlin particle contact model. The motion law of wheat granules under the action of returning plate was studied. Two factors - four levels orthogonal experiment was performed with the particle return rate as an evaluation index and

收稿日期:2019-08-10;修回日期:2019-09-09

基金项目:开封市重大科技专项(19ZD003);河南省科技攻关计划项目(172102110012);河南工业大学小麦和玉米深加工国家工程实验室项目(24400033)

作者简介:王中营(1979),男,副教授,博士,研究方向为粮食加工与粮食仓储装备关键技术研究(E-mail) wangzhongying@aliyun.com。

the inclination angle of returning plate and belt speed as factors. The results showed that the granules presented four kinds of motion modes under the push of the returning plate. The inclination angle of the returning plate was a main factor affecting the evaluation index, and the belt speed was a secondary factor. The inclination angle of returning plate  $0^\circ$  and the belt speed 3.5 m/s were the optimal combination parameters and the particle return rate was 43.76% under these conditions. Small inclination angle of the returning plate was beneficial to the returning plate to carry more particles and reduced the accumulation of particles at the bottom of the roller. The particle return rate was positively correlated with the belt speed, and high belt speed could increase the particle return rate. The results revealed the return mechanism of the returning device and the influence law of the returning performance, which provided theoretical guidance for the structural optimization of the returning device.

**Key words:** belt conveyor; returning device; returning performance; discrete element method; EDEM

带式输送机用于颗粒状、小块状以及粉状物料的水平或倾斜方向输送,具有结构简单、传动可靠、能耗较低、输送距离远、输送量大、维护方便等优点,在粮食储藏、矿山、煤炭、冶金、化工等领域被广泛使用<sup>[1]</sup>。带式输送机可分为开放型、半封闭型和全封闭型3种。开放型和半封闭型带式输送机由于粉尘污染严重、撒料无法回收而只用于要求不高的行业。近年来,随着人们环保意识的增强和带式输送机技术水平的提高,全封闭型带式输送机越来越受到市场的欢迎。但是,全封闭型带式输送机在使用过程中仍然存在诸多问题,如:尾部撒料积压严重,人工清理困难等<sup>[2]</sup>。尾部撒料积压使皮带承受较大的摩擦力,降低皮带的使用寿命,甚至使改向滚筒阻力过大导致设备停机或断轴<sup>[3]</sup>,给企业带来严重的安全隐患和经济损失,因此相关机械制造企业和用户迫切需要解决这些问题。

针对带式输送机尾部积料的问题,国内外研究人员和机构对带式输送机尾部积料返料装置进行了研究。王龙志等<sup>[4]</sup>提出一种尾部积料返料装置,其特点是在原有大倾角带式输送机的基础上增设3台带式输送机和1个漏斗,其相互搭接构成一回路结构,将大倾角带式输送机回程皮带上抛撒下的物料返回到大倾角带式输送机的接料端。王国荣等<sup>[5]</sup>也提出一种尾部积料返料装置,其特点是在带式输送机回程皮带下方安装一接料槽,从回程皮带上抛撒的物料落入接料槽并滑落至集料漏斗中,随后物料又滑落到返料带式输送机上,最后由返料带式输送机将回收的物料送回至带式输送机的承载带上,实现撒料的继续输送。文献<sup>[2,6-7]</sup>以及美国捷赛(GSS)公司等相继研发出一种结构相似且简单的封闭式带式输送机尾部积料返料装置,其特点是在改向滚筒两端沿圆周方向均匀设置若干个返料板,

返料板借助于旋转运动和圆弧形机尾壳,将抛撒到改向滚筒两端的物料抛到承载带上,实现撒料的返回和继续输送。

上述文献提出的某些返料装置/结构方案较为复杂,需增设过多的带式输送机和零部件,设备购置费和使用成本较高,故障率也较高。而结构简单的返料装置又未通过理论分析和结构优化,未能掌握颗粒在返料板作用下的运动规律,在使用过程中不能有效地将尾部积料完全清除,随着时间的延长,尾部积料层厚度逐渐增加并将改向滚筒与机尾壳内壁之间的空隙填满,甚至使物料粉压实结块,皮带磨损越加严重甚至使设备停机。目前还没有关于散体颗粒在带式输送机返料装置中的运动规律及返料性能研究的相关报道。

针对现有带式输送机尾部积料返料装置所存在的缺陷,笔者提出采用离散单元法(Discrete Element Method, DEM)研究返料装置返料板倾斜角、带速对返料性能的影响以及颗粒的运动规律,揭示返料装置的工作机理,以期为返料装置的结构优化提供理论依据。

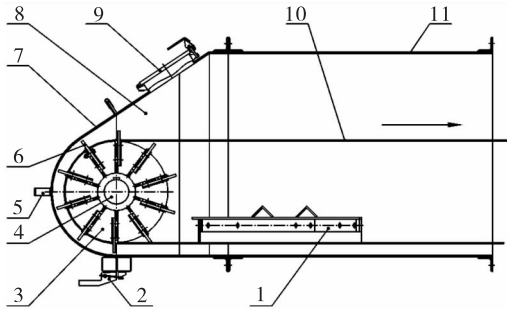
## 1 返料装置的基本结构和工作原理

### 1.1 基本结构

全封闭带式输送机的尾部结构主要由空载段清扫器、密封快开门、改向滚筒、轴、返料装置、后盖、尾座、伸缩外箱体等组成,如图1所示。机尾后盖圆弧与改向滚筒同轴;空载段清扫器设置在靠近改向滚筒前和空载段皮带上方,用于清理空载段皮带非工作面上的物料,将撒落的物料导送到改向滚筒的两端。

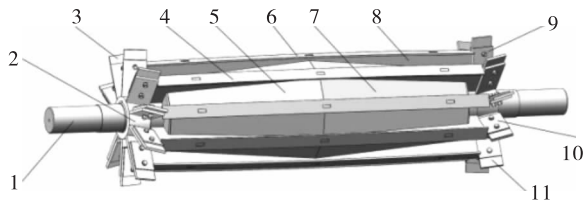
图2是改向滚筒与返料装置的基本结构,一对返料装置3对称置于改向滚筒6的两端。改向滚筒6外圈是由10根条形扁钢4沿辊筒外圈圆周方向

均匀布置的条形筒体构成,条形扁钢间保留一定间距,改向滚筒内圈是由两个锥形筒5和7构成,锥形筒小径朝向改向滚筒的端部,2个锥形筒大径口对口焊接在一起,锥形筒与条形扁钢通过立板8焊接在一起,锥形筒小径通过圆环形透盖与轴1连接。返料装置通过轮毂2与轴1连接,10个固定板9均匀焊接在轮毂2外圈上并与轮毂2轴线呈一定夹角,返料板11和压板10通过螺栓连接在固定板9上。



注:1. 空载段清扫器;2. 密封快开门;3. 改向滚筒;4. 轴;5. 拉手;6. 返料装置;7. 后盖;8. 尾座;9. 密封快开门;10. 输送带;11. 伸缩外箱体。

图1 全封闭带式输送机尾部结构示意图



注:1. 轴;2. 轮毂;3. 返料装置;4. 条形扁钢;5、7. 锥形筒;6. 改向滚筒;8. 立板;9. 固定板;10. 压板;11. 返料板。

图2 改向滚筒与返料装置结构图

1.2 工作原理

倘若有少量物料撒落到带式输送机空载段的上表面,当物料被输送到机尾时,空载段清扫器就将物料刮向改向滚筒的两端;当改向滚筒两端收集的物料遇到转动的返料装置上返料板时,物料被返料板抛撒出去并落到承载带表面上;最后,物料被输送到机头的出料口,从而实现机尾自清扫和返料功能。

2 返料装置离散元仿真模型

2.1 颗粒接触力学模型

离散元软件 EDEM 是英国 DEM - Solutions 公司基于离散单元法开发的用于模拟和分析散体颗粒处理和生产操作的通用 CAE 软件,通过模拟散体颗粒加工处理过程中颗粒体系的行为特征,协助研究人员对各类散体颗粒处理装备进行设计、测试和优化<sup>[8]</sup>。EDEM 可以管理每个颗粒的个体信息并计算作用于颗粒上的力,通过跟踪每个颗粒的运动轨迹

获取颗粒群整体的运动状态,在农业工程领域已成功用于各类工况下的颗粒运动仿真和设备结构优化<sup>[9-13]</sup>。

颗粒接触模型是离散单元法的重要基础,Hertz - Mindlin 接触模型是 EDEM 软件中默认的接触模型。该模型在农业散体颗粒的筛分和输送等工程领域有成功的应用<sup>[14]</sup>,因此笔者采用该接触模型分析散体颗粒群在返料板作用下的运动规律。Hertz - Mindlin 接触模型如图3所示,假设颗粒为刚性体,颗粒之间为点接触,接触特性为软接触,在所有时间中任何离散单元所受的合力可由与其接触的离散单元之间的相互作用来确定。

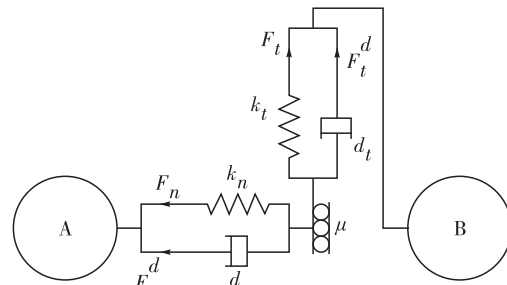


图3 颗粒接触力学模型

Hertz - Mindlin 接触模型颗粒间的法向力  $F_n$ 、切向力  $F_t$ 、法向阻尼力  $F_n^d$ 、切向阻尼力  $F_t^d$  分别为<sup>[15-18]</sup>:

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^* \alpha^3} \tag{1}$$

$$F_t = -S_t \delta \tag{2}$$

$$F_n^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n m^* v_n^{rel}} \tag{3}$$

$$F_t^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_t m^* v_t^{rel}} \tag{4}$$

其中:

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B}$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \mu_A^2}{E_A} + \frac{1 - \mu_B^2}{E_B}$$

$$\alpha = R_A + R_B - |\mathbf{r}_A - \mathbf{r}_B|$$

$$S_t = 8G^* \sqrt{R^* \alpha}$$

$$S_n = 2E^* \sqrt{R^* \alpha}$$

$$\beta = \frac{\ln \varepsilon}{\sqrt{\ln^2 \varepsilon + \pi^2}}$$

$$m^* = \frac{m_A m_B}{m_A + m_B}$$

$$\mathbf{v}_n^{rel} = (\mathbf{v}_A - \mathbf{v}_B) \cdot \mathbf{n}$$

$$\mathbf{v}_t^{rel} = (\mathbf{v}_A - \mathbf{v}_B) \cdot \mathbf{t}$$

$$G^* = \frac{2 - \mu_A^2}{G_A} + \frac{2 - \mu_B^2}{G_B}$$

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{r}_A - \mathbf{r}_B}{|\mathbf{r}_A - \mathbf{r}_B|}$$

式中： $E^*$ 为等效弹性模量，Pa； $R^*$ 为等效粒子半径，m； $\alpha$ 为法向重叠量，m； $\delta$ 为切向重叠量，m； $S_t$ 为切向刚度，N/m； $S_n$ 为法向刚度，N/m； $m^*$ 为等效质量，kg； $v_n^{rel}$ 为法向相对速度，m/s； $v_t^{rel}$ 为切向相对速度，m/s； $m_A$ 、 $m_B$ 为颗粒A、B的质量，kg； $\mu_A$ 、 $\mu_B$ 为颗粒A、B的泊松比； $E_A$ 、 $E_B$ 为颗粒A、B的弹性模量，Pa； $R_A$ 、 $R_B$ 为颗粒A、B的半径，m； $\mathbf{r}_A$ 、 $\mathbf{r}_B$ 为颗粒A、B球心位置矢量，m； $\mathbf{v}_A$ 、 $\mathbf{v}_B$ 为颗粒A、B碰撞前速度矢量，m/s； $\mathbf{n}$ 为颗粒A、B碰撞时的法向单位矢量； $\mathbf{t}$ 为颗粒A、B碰撞时的切向单位矢量； $G^*$ 为等效剪切模量，Pa； $\varepsilon$ 为恢复系数； $G_A$ 、 $G_B$ 为颗粒A、B的剪切模量，Pa。模型中切向力与摩擦力 $\mu_s F_n$ 有关， $\mu_s$ 为静摩擦因数，滚动摩擦可以通过接触表面上的力矩来表示，即

$$T_i = -\mu_r F_n R_i \boldsymbol{\omega}_i \quad (5)$$

式中： $\mu_r$ 为滚动摩擦因数； $R_i$ 为质心接触点的距离，mm； $\boldsymbol{\omega}_i$ 为接触点处物体单位角速度矢量，rad/s。

## 2.2 颗粒离散元模型

散体颗粒以小麦颗粒为例，小麦颗粒形状近似于椭球形，随机选取50颗小麦并利用游标卡尺对其长、短轴进行测量，得到其平均长轴为6.8 mm，平均短轴为3.4 mm。形状对颗粒运动会产生较大影响，因此在建立小麦颗粒离散元模型时其形状应尽量接近于真实的小麦颗粒，但同时又综合考虑到计算机所能承受的计算时间和计算精度，采用5个球元叠加近似模拟小麦颗粒，并将长轴和短轴的尺寸扩大2倍，即长轴为13.6 mm，短轴为6.8 mm，如图4所示。

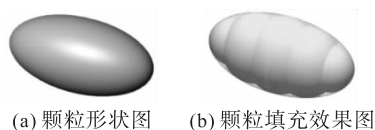
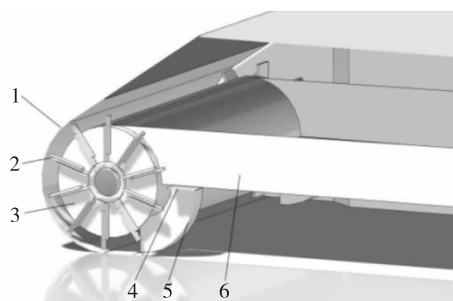


图4 小麦颗粒离散元模型

## 2.3 返料装置物理模型

以TDSF100型全封闭带式输送机尾部返料装置为研究对象，为便于模型仿真和统计颗粒数量，在建立返料装置物理模型前有必要对实物的局部结构进行简化或改造，如：改向滚筒简化为一圆柱体；为收集、统计颗粒和防止颗粒飞溅出去，承载带采用收集槽来代替，收集槽上沿与承载带的高度平齐，落入收集槽中的颗粒即认为落到承载带上；省略掉空载

带；在改向滚筒两侧斜前方与收集槽底部的位置分别设置1个颗粒生成工厂，为使生成的颗粒快速滑落至返料板底部，在颗粒生成工厂的下方增添1个圆弧形滑槽。采用三维软件构建与全封闭带式输送机尾部实体尺寸相同的仿真模型，如图5所示。带式输送机倾斜输送角度为15°，改向滚筒直径为350 mm，带宽为1 m，改向滚筒两侧各均匀分布有10个长方形的返料板，返料板与机尾外壳内壁的间隙为9 mm，返料板与改向滚筒的轴线呈0°~20°的倾斜角，输送机带速可在3~3.5 m/s的范围内调节。



注：1. 机尾外壳；2. 返料板；3. 改向滚筒；4. 颗粒工厂；5. 滑槽；6. 收集槽。

图5 返料装置模型纵截面图

## 2.4 仿真参数设置

带式输送机外壳、改向滚筒等结构材料为钢板，输送带为橡胶，返料板为聚氨酯，小麦颗粒（麦粒）、钢板、橡胶及聚氨酯的材料属性见表1，小麦颗粒与小麦颗粒、钢板、输送带、返料板之间的接触属性见表2<sup>[19-21]</sup>。

表1 材料属性

材料	泊松比	剪切模量/MPa	密度/(kg/m <sup>3</sup> )
麦粒	0.30	2.60	1 380
钢板	0.30	700	7 800
橡胶	0.47	2.67	1 500
聚氨酯	0.331	221.4	1 072

表2 材料接触属性

材料	恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
麦粒-麦粒	0.20	0.58	0.01
麦粒-钢	0.50	0.58	0.01
麦粒-橡胶	0.45	0.50	0.01
麦粒-聚氨酯	0.51	0.60	0.01

## 2.5 返料性能评价

目前还没有一种评价方式来评价返料装置的返料性能，本文采用颗粒返回率 $R_{ret}$ 来评价返料装置返料性能的大小。 $R_{ret}$ 的计算公式为：

$$R_{ret} = \frac{N_{ret}}{N_{gen}} \times 100\% \quad (6)$$

式中: $N_{gen}$ 表示颗粒工厂生产的颗粒总数; $N_{ret}$ 为落入收集槽中(承载带)的颗粒数。

### 3 颗粒群运动仿真分析

根据目前全封闭带式输送机的运行参数,带速取 3.5 m/s,返料板倾斜角为  $9^\circ$ ,设定带式输送机的处理量为 600 t/h,约有 0.5% 的物料被撒到机壳底部并滚动到机尾,即 0.833 kg/s 的物料量,单个小麦颗粒离散元模型质量为  $4.2 \times 10^{-4}$  kg,2 个颗粒工厂同时生产颗粒,则每个颗粒工厂每秒钟需要生成约 1 000 个颗粒,颗粒生产方式为 Dynamic,颗粒生成时间为 5 s,颗粒总数为 10 000 个,仿真时间为 5 s,以 Rayleigh 时间步的 20% 作为计算时间步长,计算结果每 0.01 s 自动保存一次。

采用以上数据对小麦颗粒群在返料板作用下的运动规律进行仿真模拟。图 6 是 1~5 s 时间段颗粒群的运动过程,颗粒首先由颗粒工厂生成,随后通过滑槽滑落至改向滚筒两端底部,用于模拟空载段清扫器,将空载段上表面撒落物料推向改向滚筒两端底部,最后在返料板的推动下被抛撒出去,落入收集槽内的颗粒是由统计盒实时统计的颗粒数量。

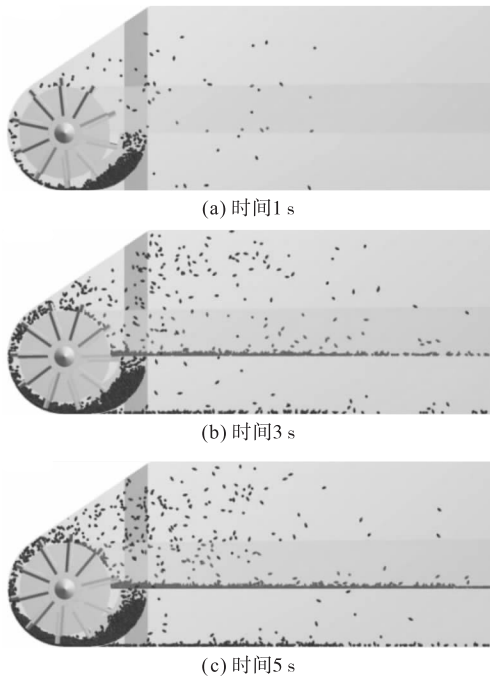


图 6 颗粒群的运动过程

图 7 是从 EDEM 后处理中提取出的小麦颗粒群在 4.5~5 s 时间段内的运动轨迹。由图 7 可以看出,大部分颗粒沿后盖与返料板旋转圆周轨迹所围成的切线方向被抛撒出去,部分颗粒被抛撒到机壳斜边侧壁上出现明显的碰撞反弹轨迹。

图 8 为从颗粒群中随机选取的 4 个典型颗粒

并提取其运动轨迹,结合图 7 可以看出,从颗粒的运动轨迹和落料点位置可将颗粒的运动方式分为以下 4 种:①是颗粒在返料板的推动下呈抛物线运动轨迹落至收集槽内(即承载带上);②是颗粒脱离返料板后碰撞到机壳斜边侧壁上,随后被反弹到收集槽内;③是颗粒呈抛物线运动轨迹穿过收集槽与机壳内壁间的缝隙后落到机壳底板;④是颗粒被返料板斜拨向改向滚筒的底部。至于颗粒群实际运动轨迹如何,由于目前缺少相应的高速视觉试验设备和软件,颗粒群实际运动轨迹尚无法测量。

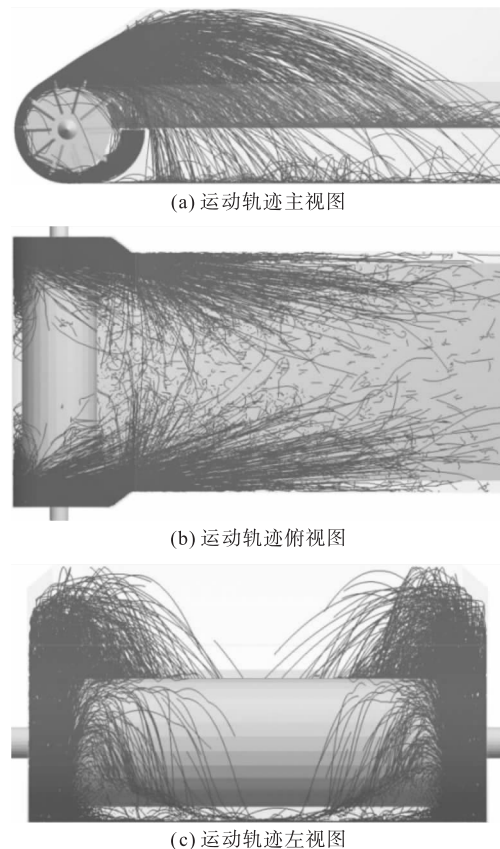
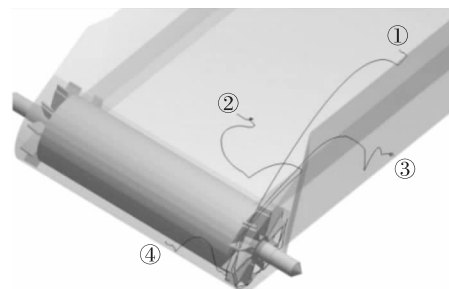


图 7 颗粒群的运动轨迹



注:①、②、③、④为颗粒的 4 种运动方式。

图 8 典型颗粒的运动轨迹

图 9 是仿真得到的改向滚筒底部残留的颗粒,图 10 是改向滚筒底部残留颗粒现场试验结果。由图 9 可以看出,改向滚筒底部残留颗粒层厚度由改

向滚筒两端向中部逐渐减少,返料板附近的颗粒层厚度较厚,该结论与图10试验结果较为吻合。

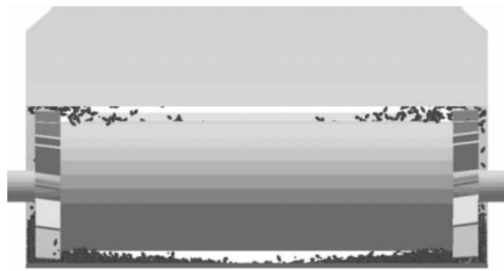


图9 改向滚筒底部残留颗粒仿真结果

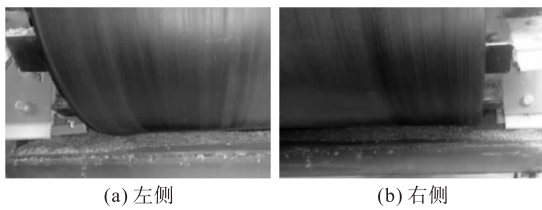


图10 改向滚筒底部残留颗粒现场试验结果

#### 4 返料性能正交试验与参数优化

全封闭带式输送机尾部返料装置的返料性能主要受返料板结构、返料板倾斜角、带速等因素的影响。现有返料板均采用平板形结构,笔者前期研究先保持返料板的结构形式不变,采用正交试验初步探讨返料板倾斜角和带速双因素多水平对返料性能的影响,并进行参数优化组合,后期再对返料板结构形式及其他因素开展研究。

正交试验以颗粒返回率作为评价指标,目的是提高颗粒的返回率,颗粒返回率越高,也即返料装置的返料性能越好。为准确分析返料板倾斜角和带速对颗粒返回率的影响,综合考虑试验目的、生产经验、文献[6]和仿真准确性,每个影响因素取4个水平,采用 $L_{16}(4^2)$ 正交试验表开展仿真正交试验。正交试验因素及水平和正交试验设计及结果分别如表3和表4所示。

表3 正交试验因素及水平

水平	A 返料板倾斜角/(°)	B 带速/(m/s)
1	0	3.00
2	6	3.17
3	12	3.33
4	18	3.50

从表4可以看出:因素A(返料板倾斜角)是影响试验指标的主要因素,因素B(带速)是次要因素;根据 $k$ 值的大小,可以得到 $A_1B_4$ 为最优因素水平组合,而 $A_1B_4$ 组合恰好出现在表4中,即返料板倾斜角 $0^\circ$ 和带速 $3.5\text{ m/s}$ ,此时颗粒返回率为 $43.76\%$ ,在所有试验组中值最大。

表4 正交试验设计及结果

试验号	A	B	颗粒返回率/%
1	1	1	37.18
2	1	2	41.16
3	1	3	42.14
4	1	4	43.76
5	2	1	36.08
6	2	2	36.34
7	2	3	39.60
8	2	4	40.66
9	3	1	37.40
10	3	2	38.36
11	3	3	39.72
12	3	4	41.34
13	4	1	33.06
14	4	2	35.56
15	4	3	34.92
16	4	4	37.42
$k_1$	41.06	35.93	
$k_2$	38.17	37.86	
$k_3$	39.20	39.09	
$k_4$	35.24	40.80	
R	5.82	4.87	

根据表4极差分析得到各试验因素水平与颗粒返回率均值趋势对比图,如图11所示。

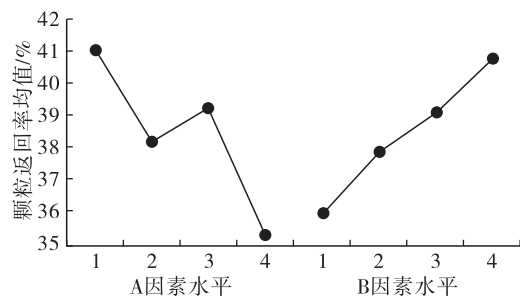


图11 各因素水平与颗粒返回率均值趋势对比图

由图11可知,对于因素A,颗粒返回率均值整体趋势是随返料板倾斜角的增加而逐渐降低,在水平3处出现小幅反弹。分析认为:倾斜角大的返料板在抛撒物料的同时,也将部分物料斜拨向改向滚筒的底部,使返料板能够携带走的颗粒数量减少,而倾斜角小的返料板则有更多机会接触到颗粒;返料板倾斜角减小时,返料板抛料方向与皮带输送方向夹角减小,碰撞到机壳斜边侧壁上的颗粒增多,这种情况下颗粒经过碰撞反弹后反而更容易落入收集槽中。对于因素B,颗粒返回率均值整体趋势与带速基本呈正比关系。分析认为:尾部积料数量保持不变时,单位时间内转速快(即带速高)的改向滚筒,其上的返料板与颗粒的接触机会增多,颗粒返回率提高。

## 5 结论

(1) 颗粒群在返料板的推动下呈现 4 种运动方式: 部分颗粒沿抛物线轨迹落至承载带上; 部分颗粒撞击侧壁后反弹至承载带上; 少量颗粒沿抛物线轨迹落至机壳底部; 部分颗粒被斜推向改向滚筒的底部。

(2) 以颗粒返回率为评价指标, 返料板倾斜角和带速为考察指标进行二因素四水平正交试验, 结果显示: 返料板倾斜角是影响颗粒返回率的主要因素, 带速是次要因素; 返料板倾斜角  $0^\circ$  和带速  $3.5 \text{ m/s}$  为最优参数组合, 此时颗粒返回率为  $43.76\%$ 。

(3) 倾斜角较小的返料板有利于降低被推向改向滚筒底部中间位置处颗粒的数量, 使返料板接触并携带走的颗粒增多, 从而使碰撞到机壳侧壁上的颗粒数量增加, 颗粒经碰撞反弹后更容易落至承载带上。

(4) 颗粒返回率与带速呈正比关系, 较高带速可以提高返料板与颗粒的接触机会, 颗粒返回率也随之提高。

(5) 后续研究需要对返料板的结构进行改进, 同时增加相应装置, 使返料板接触颗粒的机会增多, 同时要减少改向滚筒底部中部位置的颗粒数量。

### 参考文献:

- [1] 朱立平, 蒋卫良. 适用于我国煤矿带式输送机典型机型的研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(11): 1916 - 1920.
- [2] 王荀, 葛林. 自动返料辊筒的改向装置: CN 202717302U [P]. 2013 - 02 - 06.
- [3] 李亚鹏, 何常青, 张华, 等. 粮食皮带机防漏料结构设计及仿真[J]. 粮食流通技术, 2011(6): 7 - 8, 45.
- [4] 王龙志, 吕世军, 王桂玲, 等. 皮带机漏料回收装置: CN 201825551U [P]. 2011 - 05 - 11.
- [5] 王国荣, 黄土希, 王菲菲. 输送机皮带返料回收装置: CN 203781269U [P]. 2014 - 08 - 20.
- [6] 李俊玲, 李留亮, 叶坚. 全封闭单托辊皮带输送机的创新设计[J]. 粮食流通技术, 2013(3): 15 - 16, 39.
- [7] 沈少南. 全封闭单托辊皮带输送机创新的优化设计[J]. 现代食品, 2016(16): 108 - 112.
- [8] 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.
- [9] 贺一鸣, 吴明亮, 向伟, 等. 离散元法在农业工程领域的应用进展[J]. 中国农学通报, 2017, 33(20): 133 - 137.
- [10] 马征, 李耀明, 徐立章. 农业工程领域颗粒运动研究综述[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 22 - 29.
- [11] 李洪昌, 李耀明, 唐忠, 等. 风筛式清选装置振动筛上物料运动 CFD - DEM 数值模拟[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 79 - 84.
- [12] 陈进, 周韩, 赵湛, 等. 基于 EDEM 的振动种盘中水稻种群运动规律研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10): 79 - 83, 100.
- [13] TIJSEKENS E, RAMON H, BAERDEMAEKER J D. Discrete element modelling for process simulation in agriculture [J]. J Sound Vib, 2003, 266(3): 493 - 514.
- [14] 李菊, 赵德安, 沈惠平, 等. 基于 DEM 的谷物三维并联振动筛筛分效果研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(8): 1018 - 1022.
- [15] LI J, WEBB C, PANDIELLA S S, et al. Discrete particle motion on sieves—a numerical study using the DEM simulation [J]. Powder Technol, 2003, 133: 190 - 202.
- [16] CLEARY P W, SAWLEY M L. DEM modelling of industrial granular flows: 3D case studies and the effect of particle shape on hopper discharge [J]. Appl Math Model, 2002, 26: 89 - 111.
- [17] DOWNEY D, CROWE T G, GILES D K, et al. Direct nozzle injection of pesticide concentrate into continuous flow for intermittent spray applications [J]. T ASABE, 2005, 49(4): 865 - 873.
- [18] 余波. 基于 EDEM 的小区收割机振动筛筛分性能研究与优化[D]. 成都: 西华大学, 2016.
- [19] 刘凡一, 张舰, 李博, 等. 基于堆积试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.
- [20] 宋伟刚, 陈洪亮, 李勤良, 等. 散状物料转载冲击载荷的 DEM 仿真[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2011, 32(11): 1631 - 1634.
- [21] 王立军, 彭博, 宋慧强. 玉米收获机聚氨酯橡胶筛筛分性能仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 90 - 96.