

多功能饲草揉丝机内物料-气流耦合运动特性分析

裴刚 翟之平 兰月政 石苏川
(内蒙古工业大学机械工程学院, 呼和浩特 010051)

摘要: 多功能饲草揉丝机在实际应用中存在容易堵塞以及抛扔距离不满足使用要求等问题, 这些问题均与机内物料-气流耦合运动特性有关。为了探究揉丝机内物料与气流耦合运动规律, 采用计算流体力学 (Computational fluid dynamics, CFD) 以及离散元 (Discrete element method, DEM) 耦合方法, 建立物料揉丝过程中气流与散碎物料耦合作用模型, 并对物料与气流之间的耦合运动规律进行数值模拟, 通过气流速度测试与物料抛扔距离试验验证耦合模型与数值计算的准确性。研究表明: 出料口 4 个测点的气流速度仿真值与实测值相对误差均在 8.1% 以内; 额定转速范围内 3 种转速下物料平均抛扔距离数值计算结果与实测值相对误差均小于 5%, 验证了物料-气流耦合模型与数值计算结果的准确性。饲草物料破碎后沿着揉碎室内壁面做环流运动, 并沿着出料管远离进料口一侧被抛出机外。揉丝机稳定运转后室内颗粒运动的最大速度始终在某一平均速度上下波动, 速度均值体现了物料颗粒在锤片打击力作用下获得动能的大小。颗粒物料获得动能越大, 装置越不易堵塞, 物料的平均抛扔距离越远。研究结果可为揉丝机内物料-气流耦合运动特性优化、避免堵塞以及增加物料抛扔距离提供基础依据。

关键词: 多功能饲草揉丝机; CFD-DEM 耦合; 运动特性; 数值模拟
中图分类号: S817.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)S2-0156-08

Analysis of Coupling Motion Characteristics of Material and Airflow in Multi-function Forage Kneading Machine

PEI Gang ZHAI Zhiping LAN Yuezheng SHI Suchuan
(School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010051, China)

Abstract: There are some problems in the practical application of multi-function forage kneading machine, such as easy blockage and throwing distance can not meet the requirements of use, which are related to the coupling movement characteristics of material and air in the machine. In order to explore the coupling motion law of material and air flow in the kneading machine, the coupling model of air flow and loose material in the process of material crushing was established by using the coupling method of computational fluid dynamics (CFD) and discrete element method (DEM), and the coupling motion law between material and air flow was numerically simulated. The accuracy of the coupling model and numerical calculation was verified by airflow velocity test and throwing distance test. The results showed that the relative errors between the simulated and measured values of the outlet airflow velocity were within 8.1%. The relative error between the numerical calculation and the measured value of the average throwing distance of the material at the three speeds within the rated speed range was less than 5%, which verified the accuracy of the coupling model and the numerical calculation results. After the forage materials were broken, they moved circularly along the wall of the crushing room and were thrown out of the machine along the discharge pipe. After the kneading machine was stable, the maximum speed of indoor particle movement always fluctuated up and down at a certain average speed, and the average speed reflected the kinetic energy obtained by the material particles under the impact force of the hammer. The larger the kinetic energy of the granular material was, the less likely the device was to be blocked, and the farther the average throwing distance of the material was. The research provided a basis for optimizing the coupling motion characteristics of material and air flow in the kneading machine,

收稿日期: 2023-06-18 修回日期: 2023-08-26
基金项目: 国家自然科学基金项目(52165034)和内蒙古自治区科技计划项目(2019)
作者简介: 裴刚(1998—), 男, 硕士生, 主要从事农业机械设计与振动噪声分析研究, E-mail: 1979564625@qq.com
通信作者: 翟之平(1966—), 女, 教授, 博士, 主要从事农业机械设计与振动噪声测试分析研究, E-mail: ngdzhazhiping@163.com

avoiding clogging and increasing the throwing distance of material.

Key words: multi-function forage kneading machine; CFD – DEM coupling; motion characteristics; numerical simulation

0 引言

多功能饲草揉丝机是将秸秆揉丝与粉碎加工集成的秸秆加工机械,经揉丝或粉碎后的秸秆便于反刍家畜采食消化,并有助于提高秸秆的利用转化^[1-3]。多功能饲草揉丝机在运转过程中易发生堵塞以及抛扔距离达不到使用要求等问题^[4],这些问题均与机内耦合流场运动特性有关。

饲草加工机械内部存在着复杂的气固两相非定常流动,国内外学者针对其内部流场进行了相关研究。文献[5-6]基于计算流体力学(CFD)分别对饲草揉碎机以及叶片式抛送装置内部的流场进行了三维模拟,得到了内流场的基本流动特性。文献[7]运用空气动力学分析了通过T型结构锤片激励,物料运动状态与揉碎机内腔气流场结构的关系。文献[8-10]采用CFD-DEM耦合技术分别对物料清选装置、盘吸式水稻排种器以及秸秆揉碎机内的农业物料颗粒运动状态以及气流与颗粒的耦合运动特性进行探索。文献[11-12]采用计算流体力学(CFD)方法对机器内部的气流-物料颗粒运动进行仿真,利用高速摄像试验验证了仿真结果的准确性。文献[13-14]采用计算流体力学与离散元法耦合的方法分析了粉碎机内部耦合流场流动特性与颗粒运动状态。文献[15-16]采用CFD-DEM耦合方法分别对联合收获机及旋风分离器内的谷物分离、破损过程进行了研究分析。上述研究成果为本文的探索提供了方法参考。

本文以大连铭川农业机械厂生产的9ZR-2.2型多功能饲草揉丝机为研究对象,采用CFD-DEM耦合的方法,在建立多功能饲草揉丝机内气流-散碎物料运动耦合模型基础上,对揉丝机内部的耦合运动特性进行数值模拟与分析,并通过气流速度与物料抛扔距离试验验证耦合模型与数值计算的准确性,以期为提高多功能饲草揉丝机内流场特性与性能提供参考依据。

1 多功能饲草揉丝机物料-气流耦合计算与分析

1.1 多功能饲草揉丝机结构与工作原理分析

多功能饲草揉丝机由进料口、动刀、壳体、下出料口、机架、上出料口、齿板(或筛片)、锤架板、锤片、筛片组成,如图1所示。饲草物料在多功能饲草

揉丝机入口处被动、静刀铡切成段状,进入揉丝室后受到转子上旋转锤片打击、内壁齿板揉搓以及气流的作用变成丝状段,在气流与抛扔叶板的共同作用下被抛出机外^[17]。

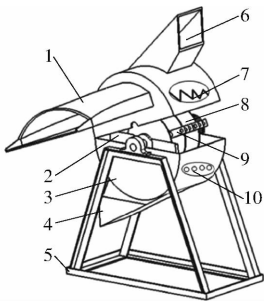


图1 多功能饲草揉丝机结构图

Fig. 1 Structure of forage kneading machine

1. 进料口 2. 铡刀 3. 壳体 4. 下出料口 5. 机架 6. 上出料口 7. 齿板 8. 锤架板 9. 锤片 10. 筛片

1.2 物料-气流耦合模型及计算流程

1.2.1 气流运动方程

多功能饲草揉丝机工作时气流从入口流入、在揉丝室内与饲草物料相互耦合,在出料管内协助输送物料,其中温度变化较小故不考虑能量守恒方程。气流运动遵守连续性方程与动量守恒方程,公式分别为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_g \mathbf{u}_g) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_g \mathbf{u}_g) + [\nabla \cdot (\alpha_f \rho_g \mathbf{u}_g)] \mathbf{u}_g = -\alpha_f \nabla P + \alpha_f \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_g +$$

$$\alpha_f \rho_g [\boldsymbol{\omega}(\boldsymbol{\omega} \mathbf{r}) + 2\boldsymbol{\omega} \mathbf{u}_g] - \mathbf{F}_{sfi} + \alpha_f \rho_g \mathbf{g} \tag{2}$$

式中 α_f ——气流相的体积分数

ρ_g ——气相密度, kg/m^3

∇ ——拉普拉斯算子

$\mathbf{u}_g$ ——气相速度, m/s

P ——气相压力, Pa

$\boldsymbol{\tau}_g$ ——气体的粘性应力张量

$\mathbf{g}$ ——重力加速度, m/s^2

$\boldsymbol{\omega}$ ——旋转参考系(转子)转速, r/min

$\mathbf{r}$ ——流体单元到参考系回转中心半径, mm

$\mathbf{F}_{sfi}$ ——饲草颗粒 i 对气流的作用力, N

1.2.2 饲草颗粒运动方程

在入口处被切成段状的饲草颗粒在揉丝室内会受到锤片、揉碎室内壁齿板、其他饲草颗粒以及气流的共同相互作用。在离散元理论中将饲草颗粒看作是离散的颗粒单元,并对每个颗粒进行单独求解,根

据牛顿第二定律计算其直线运动和旋转运动。

颗粒的直线运动可以描述为

$$m_i \frac{d\boldsymbol{v}_i}{dt} = m_i \boldsymbol{g} + \boldsymbol{F}_{MRF} + \boldsymbol{F}_{sfi} + \boldsymbol{F}_i^c \quad (3)$$

其中
$$m_i = \sum_{k=1}^N m_{ik} \quad (4)$$

$$\boldsymbol{F}_{MRF} = m_i [\boldsymbol{\omega} (\boldsymbol{\omega} \boldsymbol{r}_i) + 2 (\boldsymbol{\omega} \boldsymbol{v}_i)] \quad (5)$$

$$\boldsymbol{F}_{sfi} = \boldsymbol{F}_{di} + \boldsymbol{F}_{pi} + \boldsymbol{F}_{Mi} + \boldsymbol{F}_{Si} + \boldsymbol{F}_{Bi} + \boldsymbol{F}_{ai} \quad (6)$$

$$\boldsymbol{F}_i^c = \boldsymbol{F}_{ni} + \boldsymbol{F}_{ti} + \boldsymbol{F}_{ni}^d + \boldsymbol{F}_{ti}^d + \boldsymbol{F}_{fi} \quad (7)$$

式中 m_i ——第 i 个饲草颗粒质量, kg
 $\boldsymbol{v}_i$ ——第 i 个饲草颗粒速度, m/s
 $\boldsymbol{F}_{MRF}$ ——因转子旋转参考系产生的离心力与哥氏力, N
 $\boldsymbol{F}_i^c$ ——第 i 个颗粒受到锤片、齿板以及其他饲草颗粒的接触力, N
 N ——组成丝段状饲草颗粒的球形颗粒数
 m_{ik} ——单个球形颗粒质量, kg
 $\boldsymbol{r}_i$ ——饲草颗粒 i 到旋转参考系回转中心的向径, mm
 $\boldsymbol{F}_{di}$ 、 $\boldsymbol{F}_{pi}$ 、 $\boldsymbol{F}_{Mi}$ 、 $\boldsymbol{F}_{Si}$ 、 $\boldsymbol{F}_{Bi}$ 、 $\boldsymbol{F}_{ai}$ ——第 i 个饲草颗粒受到的曳力、压力梯度力、马格纳斯力、萨夫曼升力、巴塞特力、附加质量力, N
 $\boldsymbol{F}_{ni}$ 、 $\boldsymbol{F}_{ti}$ 、 $\boldsymbol{F}_{ni}^d$ 、 $\boldsymbol{F}_{ti}^d$ 、 $\boldsymbol{F}_{fi}$ ——第 i 个饲草颗粒受到的法向力、切向力、法向阻尼力、切向阻尼力、滚动摩擦力, N
饲草颗粒的旋转运动可以描述为^[18]

$$I_i \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{dt} = \boldsymbol{T}_{t,i} + \boldsymbol{T}_{r,i} \quad (8)$$

式中 I_i ——第 i 个饲草颗粒的转动惯量, kg·m²
 $\boldsymbol{\omega}_i$ ——颗粒旋转角速度, rad/s
 $\boldsymbol{T}_{t,i}$ ——颗粒 i 所受切向力产生的力矩, N·m
 $\boldsymbol{T}_{r,i}$ ——颗粒 i 所受滚动摩擦力产生的力矩, N·m

1.2.3 耦合计算流程

物料-气流耦合计算时,首先通过计算流体力学 CFD 方法计算在式(1)、(2)以及湍流模型控制下的气流场直至收敛;然后采用离散元 DEM 方法根据式(3)~(8)计算每个物料颗粒在所受载荷作用下的位置和速度直至收敛,其中颗粒受到气流的作用力按照物料颗粒在气流场网格单元中的位置计算;一个 CFD 时间步后,将信息更新后的颗粒同步到

CFD,并更新流体单元内的气流体积分重新计算流体-颗粒的耦合作用力,CFD 进行下一个时间步的迭代计算直至再次收敛^[19],DEM-CFD 耦合计算流程如图 2 所示。

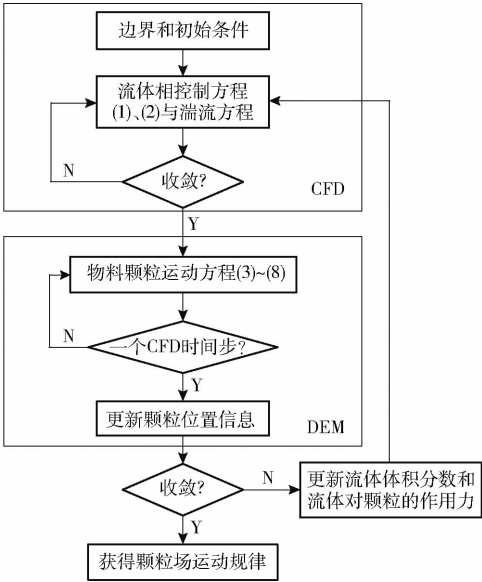


图 2 CFD-DEM 耦合计算流程图

Fig. 2 CFD-DEM coupling calculation process

1.3 EDM 参数设置

在离散元 DEM 软件 EDEM 中,设置材料属性包括秸秆物料属性和多功能饲草揉丝机各部件材料属性。其中物料为黄玉米秸秆,含水率为 9.45%,密度为 130.1kg/m³;锤片和铡刀为 65Mn 钢,锤架板和机壳为 Q235 钢,转子上的其余零件为 45 号钢,其材料属性参数、接触参数如表 1、2 所示^[20]。物料与物料、物料与锤片以及物料与揉丝机内壁齿板间的碰撞接触选用 Hertz-Mindlin 无滑移接触模型^[21];秸秆颗粒碰撞破碎过程采用颗粒粘结模型(BPM),以粘结键的断裂模拟颗粒破碎行为,即当秸秆颗粒所受最大拉应力超过其抗拉强度或所受最大剪应力超过其剪切强度时粘结键断裂。按照揉丝机实际加工的成品物料的尺寸与占比(测试过程略)来设置。由于成品物料是长短不一的丝状段物料,所以设置物料模型时采用由若干个球形颗粒组成且按实际比例近似分配的丝状段物料,如表 3 所示。添加虚拟的颗粒生成工厂平面用以产生秸秆物料,颗粒生成的速度按照实际测得的喂入量 0.145 kg/s 生成,颗粒进入饲草揉丝机内的初始速度为 5 m/s,转子转速为 2 500 r/min,重力方向为 Z 轴负方向,重力加速度为 9.81 m/s²。

1.4 CFD 参数设置与 CFD-DEM 耦合计算

由于饲草揉丝机内流场流动十分复杂^[22],瞬态计算不容易收敛,因此首先对揉丝机内气流场进行稳态计算,待稳态计算收敛后将其计算结果作为初

表 1 材料属性参数
Tab. 1 Material property parameters

材料	泊松比 μ	剪切模量 G/Pa	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
45 号钢	0. 31	7.94×10^{10}	7 850
65Mn 钢	0. 35	7.9×10^{10}	8 864
Q235 钢	0. 30	7.9×10^{10}	7 865
饲草颗粒	0. 40	2×10^7	130. 1

表 2 材料接触参数
Tab. 2 Material contact parameters

接触形式	恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
颗粒-颗粒	0. 43	0. 18	0. 09
颗粒-转子锤片	0. 54	0. 29	0. 1
颗粒-揉碎室壁面	0. 663	0. 229	0. 226

表 3 物料模型及占比
Tab. 3 Material model and proportion results

物料长度/mm	模型	占比/%
20		34. 8
40		45. 27
60		19. 93

始条件再进行瞬态计算直至收敛。

在稳态计算中,采用 MRF 模型求解揉丝机内部流场^[23]。将气流速度入口与压力出口作为边界条件,气流速度入口设定为实测入口速度均值,压力出口设为 1 个标准大气压。外壳为流体不可通壁面,转子作为移动壁面需绕 X 轴旋转,流体材料设置为空气。压力速度耦合方式采用 SIMPLE,压力项离散格式选择 PRESTO! 格式,离散格式采用一阶迎风格式,松弛因子选择默认值。由雷诺数计算公式^[24]得出揉丝机气流流动区域的雷诺数大于 4 000,揉丝机内气体流动属于湍流状态,故选取标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型^[25]。瞬态计算时旋转区域采用滑移网格模型,其余边界条件设置与稳态计算相同。

Fluent 与 EDEM 进行耦合时,EDEM 迭代时间步长为 1.32×10^{-6} s, Fluent 的时间步长通常为 EDEM 时间步长的整数倍,设置为 50 倍,即为 6.6×10^{-5} s。设置迭代时间步长为 16 000 步,最大迭代步数设置为 20,当总仿真时间到 1 s 时结束耦合计算。设置完成后,启动耦合模块将 EDEM 与 Fluent 软件进行耦合计算。

1.5 饲草颗粒群运动轨迹与运动速度分析

图 3 为饲草颗粒物料离开出料口时的质量统计云图,从图中可以看出物料颗粒主要沿着出料管远离进料口一侧抛出。这是由于进料口处的气流使物料产生轴向移动的缘故。

图 4 选取了与饲草颗粒群运动轨迹相同且具有代表性的单颗粒在 0 ~ 0.24 s 内运动轨迹。由图 4

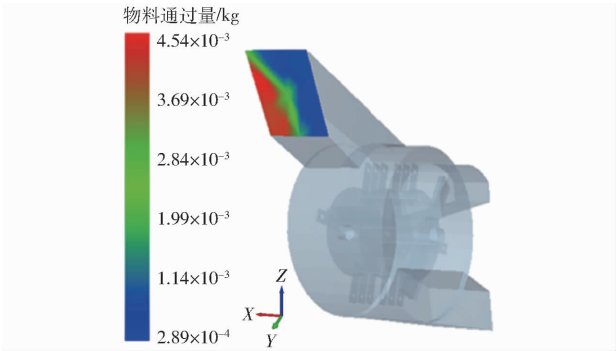


图 3 物料离开出料口质量统计

Fig. 3 Material quality statistics at outlet

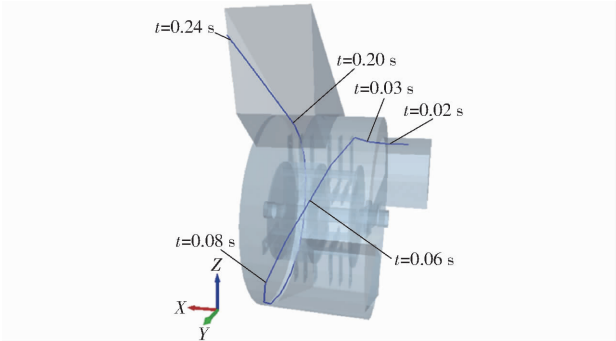


图 4 单颗粒运动轨迹

Fig. 4 Motion path of a single particle

可以看出,在铡刀、锤片、齿板、气流以及自身重力的共同作用下,饲草单颗粒从进料口 X 轴正方向开始运动,进入揉丝室后,在高速旋转的锤片打击、抛扔叶板推送与气流共同作用下,饲草颗粒沿壁面做环流运动约一周后到达上出料管内,借助气流作用被快速抛出机外。

图 5 描述了数值模拟时间为 0.07 s 和 0.25 s 的颗粒群运动轨迹。其中 0.07 s 为开始有饲草颗粒离开出料管的时刻,0.25 s 为揉丝机内颗粒运动达到动态平衡的时刻。

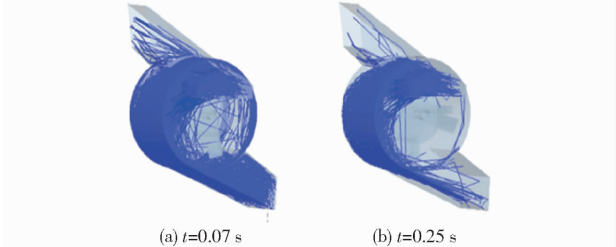


图 5 颗粒群运动轨迹

Fig. 5 Movement path of particle group

由图 5 可以看出,饲草颗粒进入揉丝机后,在高速旋转锤片与抛扔叶板产生的离心力、气流的流场力以及自身重力的共同作用下,颗粒沿着揉碎室内壁面做环流运动;随着时间的推移,颗粒运动达到动态平衡状态,物料沿内壁做整周环流运动后经出料管被抛出机外。

图 6 为不同时刻揉丝机内颗粒流动情况。由图 6 可以看出,揉丝机内饲草颗粒主要沿着揉碎室壁面做离心运动,饲草颗粒在揉碎室内主要受到锤片的击打发生破碎,且颗粒运动的最大速度都是发

生在颗粒与锤片碰撞之后,不同时刻揉碎室内颗粒运动的最大速度不同,从 0.07 s、0.25 s 到 0.3 s,颗粒最大速度由 51.69 m/s 增大到 58.11 m/s 再减小到 47.24 m/s。

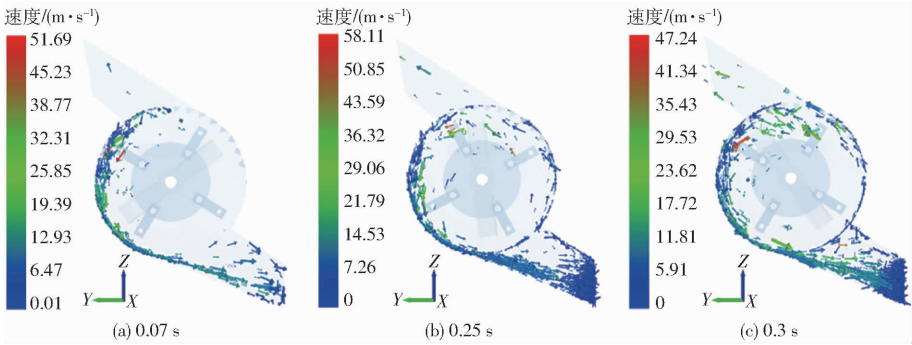


图 6 不同时刻揉丝机内颗粒流动

Fig.6 Particle flow in kneading machine at different times

为了进一步分析饲草颗粒破碎过程中颗粒速度随时间的变化规律,通过建立监测器获得揉碎室内颗粒运动最大速度随时间的变化曲线,如图 7 所示。由图 7 可以看出,揉丝机稳定运转后室内颗粒运动的最大速度始终在平均速度 52.07 m/s 上下波动,这是由于锤片、齿板以及气流作用到物料上力的不确定性以及物料的各向异性等原因造成的。速度均值体现了物料颗粒在锤片打击力作用下获得动能的大小。颗粒物料获得动能越大,装置越不易堵塞,物料的平均抛扔距离越远。

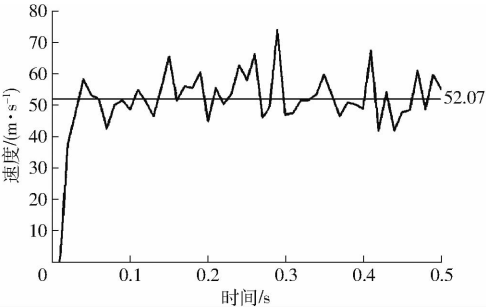


图 7 揉碎室内颗粒运动最大速度变化曲线

Fig.7 Maximum velocity curve of particle movement in crushing room

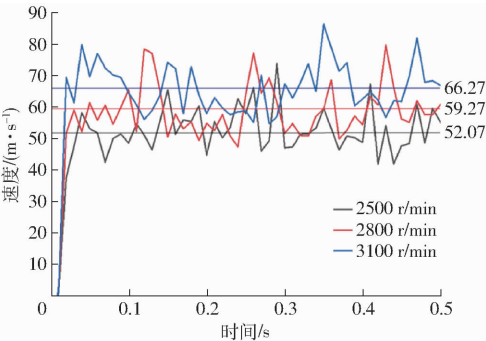


图 8 不同转速下揉碎室内颗粒运动最大速度变化曲线
Fig.8 Maximum velocity curves of particle movement in crushing room at different rotational speeds

图 8 为转子转速分别为 2 500、2 800、3 100 r/min 时揉碎室内颗粒运动最大速度随时间变化的曲线图。由图 8 可以看出,随着转速的增加揉碎室内颗粒运动最大速度也随之增加,最大速度的平均值分别为 52.07、59.27、66.27 m/s。这是因为随着转速的增加,锤片对于物料颗粒的打击力也随之增加,转子扰动流场使气流速度也增大,故物料颗粒受锤片打击与气流共同作用后获得的动能也随之增加。

2 试验验证与分析

2.1 气流速度试验

为验证气流流场仿真结果的准确性,以 9ZR-2.2 型多功能饲草揉丝机为对象,测试空载状态下进、出料口气流速度。为减小外界因素影响,在室内进行试验^[26]。其中进料口处的气流速度实测值为上述流场数值计算提供边界条件,出料口气流速度实测值用以验证流场数值模拟结果。采用德国 Testo 405i 型风速计测量气流速度,测试范围为 0 ~ 30 m/s。通过变频器将主轴调节转速至 2 500 r/min。进、出料口气流速度测试的平面位置如图 9a 所示。测点采用等面积法,出料口平面测点分布如图 9b (图中 6~9 为测点序号) 所示(进料口略)。

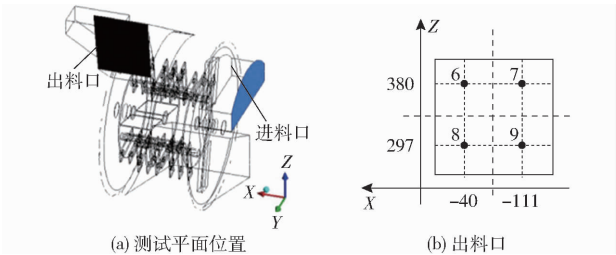


图 9 气流速度测量位置

Fig.9 Schematics of airflow velocity measurement position

将气流速度接近的 3 组重复测量值计算其均值

即为实测值。出料口各测点的气流速度实测值如表 4 所示,并与仿真计算值进行了对比。由表 4 可看出最大相对误差为 8.1%,原因是在数值模拟时对物理模型进行了简化,同时实际工作中揉碎机各部件连接处存在空气泄漏,数值仿真并未考虑。其余 3 个测点的实测值与模拟值相对误差均在 5.5% 以内,说明了气流流场仿真结果的准确性。

表 4 出料口气流速度模拟与测试结果对比

Tab.4 Comparison of airflow velocity simulation and test results at discharge port

测点序号	实测均值/(m·s ⁻¹)	模拟值/(m·s ⁻¹)	相对误差/%
6	10.05	10.86	8.1
7	4.02	4.24	5.5
8	10.58	10.60	0.2
9	2.05	2.09	2.0

2.2 饲草物料抛扔距离数值计算

为了进一步验证气-固耦合流场数值模拟结果的准确性,在离散元软件 EDEM 中分别模拟仿真转子转速为 2 500、2 800、3 100 r/min 时多功能饲草揉丝机内物料-气流耦合运动规律,并获取颗粒物料离开出料管的速度 v 。物料从出料管抛出到落地的过程可看成是一个斜抛运动,如图 10 所示。

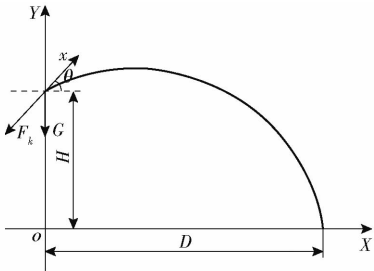


图 10 物料离开出料口后运动轨迹

Fig. 10 Trajectory of material after leaving discharge port

物料离开出料管后在水平和铅垂方向的两个运动方程为

$$\begin{cases} m \frac{d^2 X}{dt^2} = -F_k \cos\theta \\ m \frac{d^2 Y}{dt^2} = -F_k \sin\theta - mg \end{cases} \quad (9)$$

式中 m ——物料离开出料管质量,kg
 F_k ——空气阻力,N
 θ ——物料抛射角度,rad

9ZR-2.2 型多功能饲草揉丝机上出料管的抛射倾角为 32°,故 $\theta = 32^\circ$;物料离开出料口的初始条件为: $X = 0, Y = H, H$ 为出料口距地面高度。物料到达地面后, $X = D, Y = 0$ 。由式(9)可推导出物料离开出料管后的水平抛扔距离为

$$D = vt\cos\theta - \frac{1}{2}\left(g + \frac{F_k \sin\theta}{m}\right)t^2 \quad (10)$$

利用 Matlab 软件对上述斜抛运动方程进行程序编程,得到不同转速下的物料抛扔距离仿真曲线,如图 11 所示。

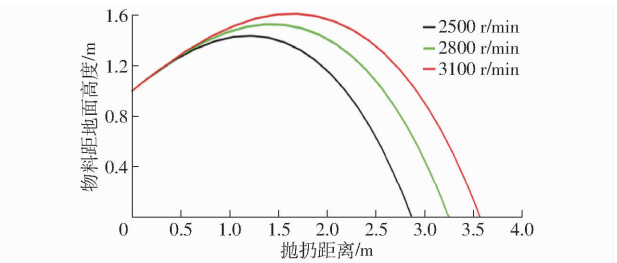


图 11 抛扔距离仿真曲线

Fig. 11 Simulation diagram of sending distance

由图 11 可知,转子转速分别为 2 500、2 800、3 100 r/min 时由数值模拟计算得到的物料离开出料管的速度作为物料初始速度,按抛扔距离计算公式(9)、(10)可得出物料平均抛扔距离依次为 2.87、3.25、3.57 m。

2.3 抛扔距离试验验证

以呼和浩特市和林格尔县地区 2022 年秋收获的黄玉米秸秆为试验物料,试验样机为大连铭川农业机械厂生产的 9ZR-2.2 型多功能饲草揉丝机,按照其额定转速范围选取 2 500、2 800、3 100 r/min 3 种转速进行试验,试验现场如图 12 所示。



图 12 饲草物料抛扔距离试验现场

Fig. 12 Sending distance of forage materials test site

在测定抛扔距离时,需要先在抛送方向上以出料口为起点,每间隔 1 m 用红色胶布划分出一条线,共分成 8 个区间。每次试验后,将抛在各个区间内的物料称量、记录后计算其平均抛扔距离。将数据非常接近的 3 组重复试验值取平均值即为平均抛扔距离。计算公式为

$$x_m = \frac{\sum (M_i x_i)}{\sum M_i} \quad (11)$$

式中 x_m ——平均抛扔距离,m
 M_i ——每部分(每米)范围内的物料质量,kg
 x_i ——每部分中点的抛扔距离,m
将试验结果与数值计算结果进行对比,如表 5

所示。由表 5 可知,转子转速分别为 2 500、2 800、3 100 r/min 时,仿真与试验结果的相对误差依次为 2.38%、4.13%、3.07%,说明基于 CFD-DEM 方法对多功能揉丝机内物料-气流耦合运动模拟结果是准确的。分析图 8 和图 11 还可看出,颗粒物料获得动能越大,装置越不易堵塞,物料的平均抛扔距离越远。为后续揉丝机内物料-气流耦合运动特性优化、

表 5 不同转速抛扔距离数值计算与试验对比
Tab.5 Numerical calculation and experimental comparison of sending distance at different rotational speeds

转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	实测抛扔 距离/m	数值计算 值/m	相对误差/ %
2 500	2.94	2.87	2.38
2 800	3.39	3.25	4.13
3 100	3.68	3.57	3.07

避免堵塞以及增加物料抛扔距离提供计算基础。

3 结论

(1) 饲草物料在铡刀、锤片、齿板、气流以及自身重力的共同作用下破碎后沿着揉碎室内壁面做环流运动,并沿着出料管远离进料口一侧被抛出机外。

(2) 揉丝机稳定运转后室内颗粒运动的最大速度始终在某一平均速度上下波动,体现了物料颗粒在锤片打击与气流共同作用下获得动能的大小。颗粒物料获得动能越大,装置越不易堵塞,物料的平均抛扔距离越远。

(3) 出料口 4 个测点的气流速度实测表明,仿真值比实测值偏大,两者之间最大相对误差为 8.1%;额定转速范围内 3 种转速下物料平均抛扔距离试验表明,数值计算结果与实测值相对误差均小于 5%;故物料-气流运动耦合模型与数值计算结果基本准确。

参 考 文 献

[1] 段天青,盛国成,张雄. 9RS-40 型秸秆揉丝机的研究与设计[J]. 中国农机化学报,2013,34(2):106-108,130.
DUAN Tianqing, SHENG Guocheng, ZHANG Xiong. Research and design of 9RS-40 straw cutting and rubbing machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(2): 106-108,130. (in Chinese)

[2] 王金武,唐汉,王金峰. 东北地区作物秸秆资源综合利用现状与发展分析[J]. 农业机械学报,2017,48(5):1-21.
WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng. Comprehensive utilization status and development analysis of cop straw resource in Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 1-21. (in Chinese)

[3] 张锋伟,宋学锋,张雪坤,等. 玉米秸秆揉丝破碎过程力学特性仿真与试验[J]. 农业工程学报,2019,35(9):58-65.
ZHANG Fengwei, SONG Xuefeng, ZHANG Xuekun, et al. Simulation and experiment on mechanical characteristics of kneading and crushing process of corn straw[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9): 58-65. (in Chinese)

[4] 张旦主,孙伟,刘小龙,等. 切揉组合式青贮玉米粉碎机的设计与研究[J]. 中国农机化学报,2019,40(6):93-100.
ZHANG Danzhu, SUN Wei, LIU Xiaolong, et al. Design and research of the combined cutting and kneading silage corn crusher [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(6): 93-100. (in Chinese)

[5] 王娟,王春光,王芳. 基于 Fluent 的 9R-40 型揉碎机三维流场数值模拟[J]. 农业工程学报,2010,26(2):165-169.
WANG Juan, WANG Chunguang, WANG Fang. Numerical simulation on three-dimensional turbulence air flow of 9R-40 rubbing and breaking machine based on Fluent software[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 165-169. (in Chinese)

[6] 翟之平,杨忠义,高博,等. 基于 Mixture 模型的叶片式抛送装置内气固两相流模拟[J]. 农业工程学报,2013,29(22):50-58.
ZHAI Zhiping, YANG Zhongyi, GAO Bo, et al. Simulation of solid-gas two-phase flow in an impeller blower based on Mixture mode[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 2013, 29(22): 50-58. (in Chinese)

[7] 刘飞,王伟,张涛,等. 锤片式揉碎机气流场数值模拟与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(增刊):227-232.
LIU Fei, WANG Wei, ZHANG Tao, et al. Air flow field numerical simulation and test of hammer rubbing machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 227-232. (in Chinese)

[8] 刘凡一. 清选装置中小麦颗粒和短茎秆离散元建模研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.
LIU Fanyi. Discrete element modelling of the wheat particles and short straw in cleaning devices[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018. (in Chinese)

[9] 赵湛,田春杰,吴亚芳,等. 盘吸式水稻排种器吸种动力学过程模拟及参数优化[J]. 农业工程学报,2018,34(7):38-44.
ZHAO Zhan, TIAN Chunjie, WU Yafang, et al. Dynamic simulation of seed pick-up process and parameter optimization on vacuum plate seeder for rice[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(7): 38-44. (in Chinese)

[10] 张涛,刘飞,赵满全,等. 基于离散元的不同转速揉碎室内秸秆群运动规律[J]. 农机化研究,2018,40(9):195-199.
ZHANG Tao, LIU Fei, ZHAO Manquan, et al. Moving law of straw groups with different rotating speed based on discrete element method[J]. Jurnal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(9):195-199. (in Chinese)

[11] SWIATEK K, LISOWSKI A. Two-stage motion of particles in the discharge spout of forage harvester [J]. Agricultural Engineering, 2010, 124(6): 245-252.

[12] LISOWSKI A, ŚWIATEK K, KLONOWSKI J, et al. Movement of chopped material in the discharge spout of forage harvester

- with a flywheel chopping unit; measurements using maize and numerical simulation[J]. *Biosystems Engineering*, 2012, 111(4):381–391.
- [13] LEE H W, SONG S, KIM H T. Improvement of pulverization efficiency for micro-sized particles grinding by uncooled high-temperature air jet mill using a computational simulation[J]. *Chemical Engineering Science*, 2019, 207: 1140–1147.
- [14] TAKEUCHI H, NAKAMURA H, IWASAKI T, et al. Numerical modeling of fluid and particle behaviors in impact pulverizer[J]. *Powder Technology*, 2012, 217: 148–156.
- [15] KORN C, HERLITZIUS T. Coupled CFD–DEM simulation of separation process in combine harvester cleaning device[C]//75th Conference on Agricultural Engineering, VDI Berichte, 2017: 199–209.
- [16] FABIO F, MOJTABA G, ANTONIA B, et al. Development of a methodology for predicting particle attrition in a cyclone by CFD–DEM[J]. *Powder Technology*, 2019, 357: 21–32.
- [17] 石苏川,翟之平,赵宇,等. 多功能饲草揉丝机内流场数值模拟与优化[J]. *东北农业大学学报*,2022,53(11):60–67.
SHI Suchuan, ZHAI Zhiping, ZHAO Yu, et al. Numerical simulation and optimization of internal flow field in multifunctional forage kneading machine[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2022, 53(11): 60–67. (in Chinese)
- [18] 章志强. 玉米秸秆粉碎抛撒还田机的设计与秸秆运动特性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
ZHANG Zhiqiang. Research on corn straw chopping and spreading machine design and dynamic characteristic of straw[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [19] 翟小艺. 基于 FMECA 与 FTA 的饲草揉碎机可靠性分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2021.
ZHAI Xiaoyi. Reliability analysis of foragecrushing machine based on FMECA and FTA[D]. Huhhot: Inner Mongolia University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [20] 王佳旭. 秸秆打捆机捡拾机构仿真分析与试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
WANG Jiaxu. Simulation analysis and experimental research on the pick-up mechanism of stalk baler[D]. Changchun: Jilin University, 2018. (in Chinese)
- [21] 高雄发, 郝聪, 张德胜, 等. 基于 CFD–DEM 的旋流泵混合颗粒固液两相流研究[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(8): 163–170, 248.
GAO Xiongfa, GAO Cong, ZHANG Desheng, et al. Solid-liquid two-phase flow of mixed particles in vortex pump based on CFD–DEM[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(8): 163–170, 248. (in Chinese)
- [22] 尚坦. 秸秆揉丝机揉搓机构内流场仿真及流固耦合分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
SHANG Tan. Analysis of fluid-structure interaction and simulation of internal flow field for cornstalk rubbing silk machine[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. (in Chinese)
- [23] ENDALEW A M, DEBAER C, RUTTEN N, et al. A new integrated CFD modelling approach towards air-assisted orchard spraying. Part I. Model development and effect of wind speed and direction on sprayer airflow[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2010, 71(2): 128–136.
- [24] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [25] 张德胜, 周游, 赵睿杰, 等. 垂直管内固-液两相流全耦合 CFD–DEM 模型研究[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(12): 212–222.
ZHANG Desheng, ZHOU You, ZHAO Ruijie, et al. Solid–liquid two-phase flow based on fully coupled CFD–DEM method in vertical pipe[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(12): 212–222. (in Chinese)
- [26] 翟之平. 叶片式抛送装置抛送机理研究与参数优化[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008.
ZHAI Zhiping. Study on throwing blowing mechanism and optimizing parameters of an impeller blower[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2008. (in Chinese)