

基于 CFD – DEM 的机采鲜叶管道集叶过程数值模拟研究

翁晓星¹ 陈长卿¹ 王 刚¹ 韦真博² 江 丽¹ 胡新荣¹

(1. 浙江省农业机械研究院, 金华 321017; 2. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058)

摘要: 为揭示乘坐式采茶机的集叶管道内部气流特性,利用计算流体力学(CFD)和离散单元法(DEM)对管道内气固两相流动进行数值模拟。通过多球面聚合法建立机采鲜叶数值计算模型,在分析鲜叶颗粒运动规律基础上,分别对其不同进口风速、鲜叶颗粒尺寸、弯管结构进行模拟分析。研究表明,数值模型可预测集叶管道的集叶效果以及最佳风速;在最佳进口风速范围内,鲜叶颗粒越大,管道内的剩余颗粒越多,容易产生沉积;鲜叶颗粒流在穿过竖直管道到弯管时形成一束弯管流曲线,且弯管结构对鲜叶颗粒运动有一定影响,流场平均速度呈先降低后升高的变化规律。选用一个弯管半径为0.04 m圆角弯管作为集叶弯管结构,同时减少横向管道长度,选择内侧长度为0.03 m 竖直管,避免鲜叶颗粒由重力作用导致的沉积,保证集叶顺畅性。数学模型仿真与试验结果表明:减少横直管长度,采用圆角弯管与适合的竖直管长度的集叶管道,穿透率不小于86.8%,满足集叶要求。本文提出的鲜叶颗粒建模方法,用于集叶管道与鲜叶流相互作用的离散元仿真分析及管道结构优化。该研究可为集叶管道其他工作参数优化提供参考。

关键词: 集叶管道; 机采鲜叶; 气固两相流; 数值模拟

中图分类号: S222.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)11-0424-09 **OSID:** 

Numerical Simulation of Leaf Gathering Process of Fresh Leaf Collecting Pipeline Based on CFD – DEM

WENG Xiaoxing¹ CHEN Changqin¹ WANG Gang¹ WEI Zhenbo² JIANG Li¹ HU Xinrong¹

(1. Zhejiang Academy of Agricultural Machinery, Jinhua 321017, China

2. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: In order to reveal the airflow characteristics in the leaf collecting pipe of a riding tea picker, the gas-solid two-phase flow in the pipe was numerically simulated by computational fluid dynamics (CFD) and discrete element method (DEM). The numerical calculation model of machine-picked fresh leaves was established by the multi-sphere polymerization method. On the basis of analyzing the movement law of fresh leaf particles, the different changes of inlet wind speed, fresh leaf particle size and bend structure were simulated and analyzed respectively. Through the numerical model the blade collecting effect and the optimal wind speed and feeding quantity of the riser pipe could be predicted. In the optimal inlet wind speed range, the larger the fresh leaf particles were, the more residual particles were in the pipeline, which was easy to produce deposition. Fresh leaf particle flow formed a bend curve when it passed through the vertical pipe to the bend. The bend structure had a certain influence on the movement of fresh leaf particles. The average velocity of flow field was decreased firstly and then increased. A rounded elbow with a radius of 0.04 m was selected as the blade collector elbow structure, and the transverse pipe length was reduced. The inner length was 0.03 m to avoid deposition caused by gravity action of fresh leaf particles and ensure the smoothness of blade collector. Through mathematical model simulation and experimental results, it was verified that the blade collecting pipe with rounded corner bend can meet the requirements of blade collecting by reducing the length of horizontal and straight pipe. The pipe with round corner elbow structure had a penetration rate of more than 86.8%. The fresh blade particle modeling method proposed was used for discrete element simulation analysis and structural optimization of the interaction between the leaf collecting pipe and the fresh blade flow. The research

收稿日期: 2022-07-29 修回日期: 2022-09-02

基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2021C02028)

作者简介: 翁晓星(1986—),女,高级工程师,主要从事农机装备和虚拟仿真技术研究,E-mail: 390920801@qq.com

results provided a theoretical basis for the optimization of optimization design of the fresh leaf collecting pipeline.

Key words: leaf collecting pipe; machine tea picking fresh leaves; gas-solid two-phase flow; numerical simulation

0 引言

茶产业是稳定就业、改善生态环境、增加人民收益的特色农业优势产业,属于绿色经济之一。茶叶是具有较强季节性和时效性的产品^[1]。但传统的种植、采摘及加工等环节需要耗费大量劳动力,其中采茶用工问题尤为突出。随着全国各地茶园面积的逐年扩大,对收获机械化的需求变得愈发迫切^[2]。针对现有小型采茶机使用劳动强度大、生产效率低等问题,乘用式跨行行驶采茶设备应运而生,极大地简化了作业工序,作业效率提高 40%,且可保持稳定良好的工作状态。日本在 20 世纪 20 年代开始研究采茶机,有乘坐式采茶机、履带自驱动乘坐式采茶机,其动力机构采用液压驱动,调节结构灵活,自动化程度高^[3]。与此同时,英国、法国、印度等国对各种采茶机构设计原理、工作原理、不足之处等进行了探索。而我国则从 20 世纪 50 年代起对茶采摘进行机采试验。近年来,国内学者主要对设备的智能采摘、液压控制和导航技术等方面进行了研究。宋扬扬等^[4]对采茶机进行总体结构设计和运动分析。韩余等^[5]利用 Sim Hydraulic 对液压系统进行了功能数值仿真,汤一平等^[6]提出了基于机器视觉的机采茶陇识别及采茶机导航的方法,杜哲等^[7]优化双动割刀往复式切割器的结构参数。在管道结构改进方面,姚正钢等^[8]研究海洋工程平台机房与变压器之间的结构管道的优化,沈雪敏^[9]对超大型风机管道结构进行了改进设计。但在采茶机械领域,集叶机构相关研究不多。

机采鲜叶属于柔性片状物料,其具有受力复杂性和变形非线性等特点,其运动特性的数值计算研究一直是计算机数值模拟的难点。柔性异形物料气固两相流是农业机械装备研制中的技术瓶颈,准确预测柔性异形物料在多相流中的运行轨迹和变形特性对集叶物理模型研究具有重要意义^[10]。随着计算能力和数值计算水平不断提高,学者开始尝试对树冠、柔性纤维和柔性片状物料的运动进行建模和数值计算。农业物料气固两相流模型研究主要集中在近球形农业物料,如稻谷、小麦、玉米等,为降低研究复杂性,通常采用等效直径、物料形状系数和比表面积等参数将非球形颗粒简化为球形物料,然后采用计算流体力学(Computational fluid dynamics,

CFD)软件和离散单元法(Discrete element method, DEM)对气固两相流模型进行数值计算,在相关装备研制方法取得了显著效果^[11-13]。刘鹏等^[14]利用 CFD-DEM 耦合的方法模拟碎秆在粉碎室内的运动受力过程。黄震宇等^[15]利用 Fluent 软件的 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型和 DPM 离散相模型,分析了蔬菜种子在风力筛选机分离室的气固两相流。雷小龙等^[16]运用 CFD-EDEM 耦合仿真方法揭示了油麦种子在气送式集排器输种管道中的运动规律。张宪等^[17]将毛茶物料简化为球形颗粒,采用流体力学方法研究了茶叶风选机内部流场和物料运行轨迹,指出风选室的涡旋现象与分选质量存在显著相关性。

本文研究基于 CFD-DEM 耦合仿真方法,对乘坐式采茶机的集叶过程进行数值模拟,以了解机采鲜叶在气流作用下的模态种类,气流分布对机采鲜叶运动的影响规律等,形成面向柔性片状鲜叶的气固两相耦合基础理论,为茶叶采摘机械化设备开发及优化提供技术依据。

1 采茶机集叶管道结构

乘坐式采茶机由采摘机构、集叶机构和行走机构等主要机构组成。利用上下锯齿刀实现采茶功能,将茶树上的鲜叶剪切下来,再利用风力把机采的鲜叶吹送到车载集叶箱。通过出风部件借助风力吹送鲜叶,可使剪切的鲜叶避免受到损害,保证机采茶叶质量。采用 SolidWorks 软件构建集叶管道的三维物理模型,如图 1 所示。图中 d 为管道宽度, R 为弯管半径, L_1 和 L_2 为内侧和外侧长度。

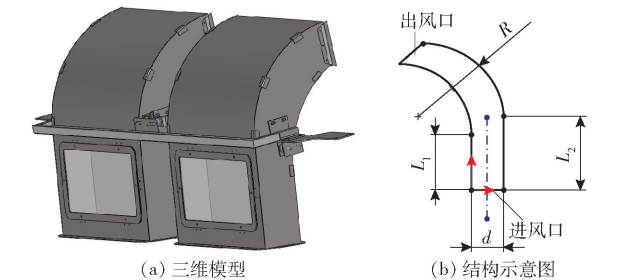


图 1 乘坐式采茶机集叶管道结构图

Fig. 1 Structure drawings of passenger tea picking machine and leaf collecting pipe

2 数学模型

采用离散单元法建立机采鲜叶离散单元模型,

对集叶管道进行数值计算研究。通过对离散单元模型和气固两相流动机理研究,实现结构优化与性能提升。气固两相流描述方法有两种:①Euler 法,不仅将气相流体作为连续介质,固相也作为连续介质,可描述颗粒运动对气相的影响^[18]。②Lagrange 法,与 Euler 法不同之处为将固相作为离散模型,其优点是可较好地描述颗粒扩散。由于鲜叶为稀疏相,通常选择 Lagrange 法为湍流分析方法。

在建立柔性片状物料力学模型时遵循以下假设:①处于平衡态的鲜叶应力为零。②当鲜叶形状偏离平衡态时会引起能量和力的变化。③鲜叶模型中能量项之间相互独立且遵守叠加原则。④鲜叶是均匀且各向同性。

2.1 气相控制方程

气相连续方程采用流体软件中的 Navier - Stokes 方程^[19-20]求解,气相质量和动量守恒方程分别为

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \Delta(\rho_g v_g) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho_g v_g)}{\partial t} + \Delta(\rho_g v_g^2) = -\Delta p + \Delta(\mu_g \Delta v_g) + \rho_g g - S \tag{2}$$

其中
$$S = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^n f_{\text{drug},i} \tag{3}$$

式中 ρ_g ——气体密度,kg/m³
 v_g ——气体速度,m/s
 g ——重力加速度,m/s²
 μ_g ——气体粘性,Pa·s
 S ——气固两相间由曳力造成的动量交换,Pa
 ΔV ——单位体积,m³
 $f_{\text{drug},i}$ ——流体动力阻力,N
 t ——时间,s p ——压力,Pa

2.2 固相控制方程

采用 DEM 求解固相,柔性片状物料变形一般认为是由应变能、弯曲能和表面能等引起,物料受到由拉伸、弯曲、表面约束和体积约束引起的力。文献[21-22]采用 IB-LBM 对弹性材料在流体中的力学特性进行研究。因此,颗粒*i*在任意时刻*t*的控制方程为

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = f_{p-g,i} + m_i g + \sum_{j=1}^{k_i} (f_{\text{contract},ij} + f_{\text{damp},ij}) \tag{4}$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^{k_i} T_{ij} \tag{5}$$

式中 m_i ——颗粒*i*质量,kg
 I_i ——颗粒*i*转动惯量,kg·m²
 v_i ——颗粒*i*滑移速度,m/s

ω_i ——颗粒*i*转动速度,r/s
 k_i ——颗粒*i*接触数
 T_{ij} ——颗粒*i,j*扭矩,N·m
 $f_{p-g,i}$ ——气固两相相互作用力,N
 $f_{\text{contact},ij}$ ——颗粒*i*与颗粒*j*间的相互作用,N
 $f_{\text{damp},ij}$ ——粘性阻力,N

3 数值计算与结果分析

采用有限体积法离散控制方程建立集叶弯管 SolidWorks 几何模型,对管道鲜叶颗粒流动进行分离式隐式求解。采用 *k-ε* 多相流湍流模型,使用压力速度耦合 SIMPLEC 算法;采用 Manninenn 代数滑移公式计算鲜叶颗粒与空气之间相对速度;采用 Schiller - Naumann 模型函数计算曳力函数,分析鲜叶颗粒在集叶管道中的运动情况和特性分布^[23]。

3.1 物理模型

机采鲜叶形状主要有不规则枝状、茎秆状和片状等,本文采用芽头、一芽一叶和一芽二叶多元混合颗粒体构成机采鲜叶物料群,其中芽头、一芽一叶和一芽二叶物料几何尺寸在分别在 0.02~0.04 m、0.04~0.06 m 和 0.06~0.08 m 之间随机分布,采用多球面聚合法建立机采鲜叶数值计算物料模型,如图 2 所示^[10]。仿真过程中不限颗粒数量,颗粒尺寸在 0.02~0.08 m 范围内生成,机采鲜叶物理特性如表 1 所示。

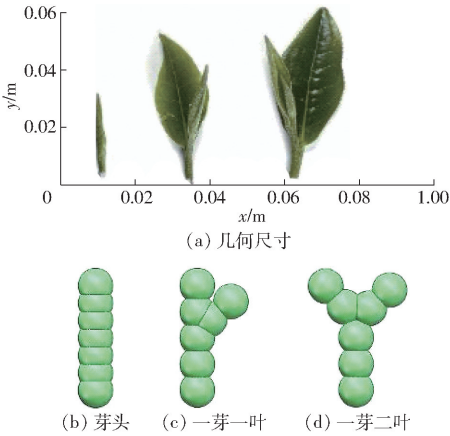


图 2 机采鲜叶离散单元模型
Fig. 2 Discrete element model of machine-picked fresh leaf

表 1 机采鲜叶参数

参数	数值
鲜叶密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	532
鲜叶泊松比 γ	0.4
鲜叶剪切模量 G/Pa	2.7×10^6
静摩擦因数	1.0
动摩擦因数	0.15

根据茶园采茶机出风部件所处的工作环境要

求。流体工作介质为空气,属于牛顿流体型流体,假定空气在压力为 102 325 Pa、温度为 26.85°的条件下密度和粘度不变,其中空气密度取 1.16 kg/m³。假定流体在流动时工作介质为连续不可压缩粘性流体,且出风收集鲜叶时,风机供风稳定,风速是以等速均匀从风口进入,忽略工作介质空气在出风部件内部流动时的热量交换。

3.2 网格划分

考虑计算量,将集叶管道的几何模型分区域划分网格。结构化网格采用映射法对通风管道进行六面体网格划分,而非结构化网格指定的网格区域主要采用四面体网格。集叶管道网格模型如图 3a 所示,网格总数为 150 477,最小单元质量为 0.143 9,质量直方图整体靠右(图 3b),网格质量满足要求。

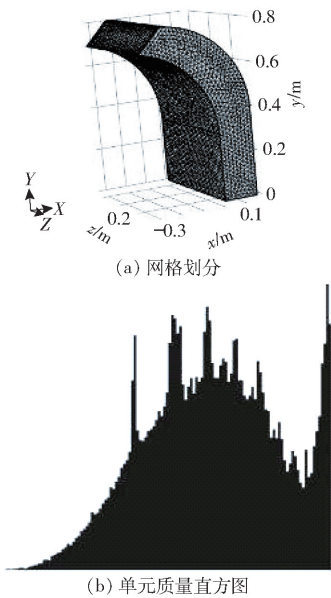


图 3 集叶管道网格模型和单元质量直方图
Fig.3 Grid model and cell quality histogram of leaf collecting pipe

3.3 边界条件

在集叶管道数值模拟中,忽略由于热量交换带来的影响,即不考虑能量方程。流场属于湍流流动,工作介质为空气,不存在相变,且在计算过程中不存在化学反应等。模拟数值中选用基于压力的分离隐式求解器进行求解。为了提高计算精度,减少数值扩散,动量、湍动能和湍流耗散率等采用二阶迎风流离散格式;选用压力速度耦合 SIMPLEC 算法;工作环境设为 1 个标准大气压。表 2 为用于模拟的边界条件设置。弯管进口和出口均假设为逃逸条件,壁面假设为反弹条件^[24]。

3.4 仿真结果与分析

考虑生产实际及作业条件,进一步研究进口速度、颗粒粒径和弯管结构等主要因素对集叶效果的

影响规律。仿真过程中,将颗粒尺寸选择 0.02、0.05、0.08 m,通过设置进口分别释放 1 000 个颗粒,模拟芽头、一芽一叶、一芽二叶在集叶管道的变化情况。

表 2 模拟试验流体参数与边界条件
Tab.2 Parameters and boundary conditions of simulated test fluid

类型	项目	方法或数值
模拟参数	几何空间	3D
	网格数量	150 477
	湍流模型	标准 $k-\varepsilon$
	离散化方法	二阶迎风
	壁面模型	无滑移
	求解器	压力和隐式求解器
边界条件	进口边界	速度进口
	进口速度/(m·s ⁻¹)	10 ~ 30
	出口边界	压力出口
	压力/Pa	102 325
	重力加速度/(m·s ⁻²)	9.8

3.4.1 风速影响

当初始速度为 15 m/s,颗粒尺寸 0.02 m, $t=0 \sim 0.05$ s 过程中集叶管道流场变化情况,如图 4 所示。当风机气流从出风部件上端引导气流进入出风腔后,将剪切的鲜叶吹到集叶管道进口,通过管道到达车载集叶箱。

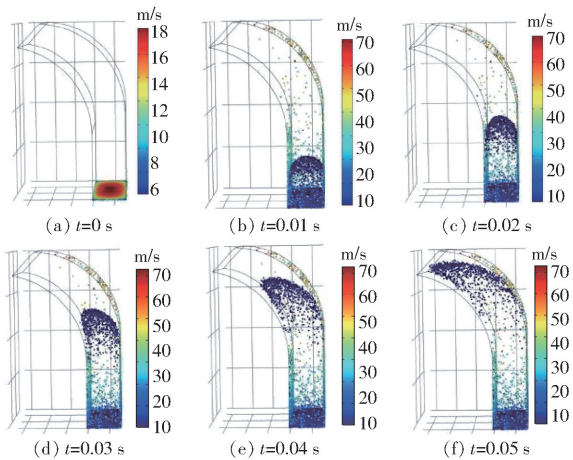


图 4 鲜叶在空气提升管道中的运动分布
Fig.4 Motion distribution diagrams of fresh leaf in air lift pipe

由图 5 可知,集叶管道进口速度从 10 m/s 增加到 30 m/s,出口速度也随之增加。当进口速度大于 25 m/s,出口速度增加率变小,此时不断增大进口进度,出口速度变化不大。选择风速 25 m/s 左右即可达到集叶效果。

如图 6 所示,速度切面中间速度比四周高,越靠近管道壁面,速度越小。由于气流受到粘度和边界影响,管道壁面附近流动变得滞缓,速度脉动剧烈。

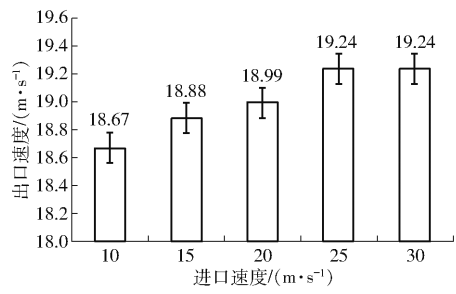


图5 不同进口速度下出口速度分布情况

Fig.5 Distribution of outlet velocity at different inlet velocities

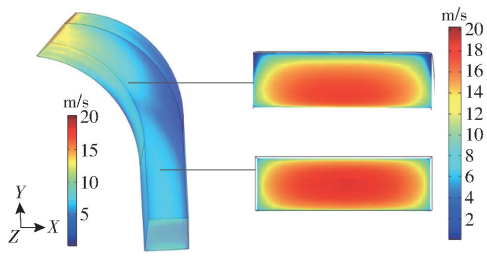


图6 $v=25\text{ m/s}$ 时 YZ 平面速度分布云图

Fig.6 Cloud diagram of velocity distribution in YZ plane when $v=25\text{ m/s}$

当鲜叶颗粒流经过竖直管时速度分布上下壁面均匀对称,而经过弯管后速度分布开始变化,到水平横直管,可明显看出下壁比上壁速度大,分布不均匀对称。此现象是因为鲜叶颗粒受到自身的重力作用,弯管和横直管内气流向下沉淀。通过增大进口速度可使鲜叶颗粒在竖直管道时浓度提高,而在水平横直管道底部颗粒的浓度也会减小。可选择进口速度 25 m/s,能达到出口速度峰值,满足实际生产要求。

3.4.2 鲜叶颗粒影响

模拟不同半径鲜叶颗粒进入集叶管道的流场情况。图 7 为 $t=0.06\text{ s}$ 时相同进口速度下分别释放 3 种不同尺寸的鲜叶颗粒运动状态。由图 7 可知,颗粒越大,管道内的剩余颗粒越多,更容易产生沉积^[25]。图 8 为管道水平和竖直方向上(弯角处为临界点)不同半径颗粒在不同位置的速度变化趋势。

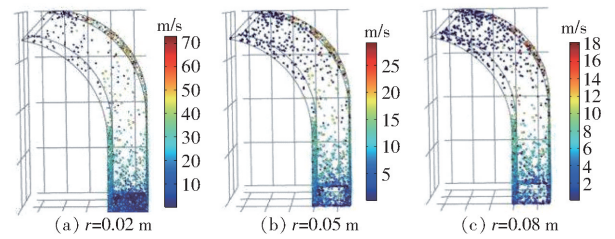


图7 在 $t=0.06\text{ s}$ 时不同半径颗粒运动状态

Fig.7 Particles with different radii move at $t=0.06\text{ s}$

由于鲜叶运动轨迹具有随机性,在集叶管道的分布不完全相同,但模拟得到的 3 种单一颗粒尺寸运动趋势一致。鲜叶颗粒处于竖直管道时速度总体保持

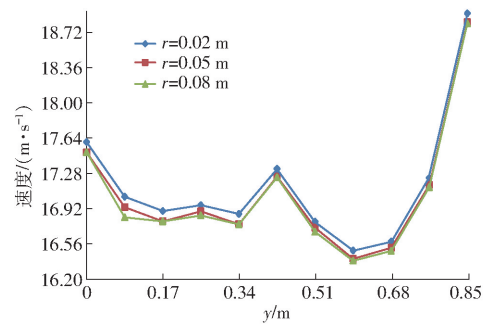


图8 不同半径颗粒的运动速度变化

Fig.8 Velocity changes of particles with different radii

稳定,经过弯道速度开始发生变化,从弯管到横管道速度由下降到逐渐上升的过程。且颗粒越大,质量越大,惯性力也越大,致使受重力和离心力作用增大,颗粒与壁面相互作用的强度增大,速度下降得越多。因此当鲜叶一芽二叶居多时,需增加进口速度,避免弯管处大量沉积,无法顺利集叶。在不同采摘要求下,可根据鲜叶特点,调节吹风进口速度,节能环保。

3.4.3 管道结构影响

根据乘坐式采茶机整机结构特点,考虑车载集叶箱体和割刀吹叶机构尺寸,合理设计集叶管道高度与宽度。利用 SolidWorks 软件三维构建弯管结构,设计成一定高度与宽度的方角和圆角两个模型。图 9b 为半径 0.02 m 的鲜叶颗粒在不同进口速度的状态下,通过两个不同弯管模型的速度。从图 7,9a 可知,方管比圆管在转弯区段沉积的颗粒数明显增多。因为颗粒流在穿过竖直管道到弯道时形成一束弯管流曲线(图 4),由于同等竖直管道长度的方管壁面阻碍了颗粒流的转弯流动,使得大量颗粒不能顺利到达横管道。若将方管横管道宽度变大,竖直管内侧高度变小,从而满足弯管流完整曲线,可避免沉积现象。但结构改变,会影响集叶装置的收集容量。选择圆角弯管,更适合集叶要求。但根据前期研究发现,随着弯角个数的增加,反而会增加沉积率。因而选择一个圆角弯管作为集叶弯管结构,同时减少横向管道长度,避免鲜叶颗粒的重力作用导致的沉积。

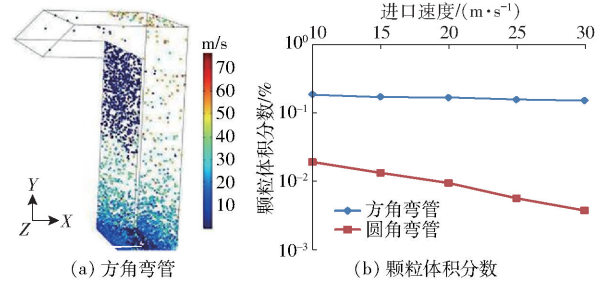


图9 运动分布与不同初始风速下的颗粒体积分数

Fig.9 Motion distribution and particle volume fraction at different initial wind speeds

初始速度为 25 m/s 时,不同 L_1 长度的速度场如图 10 所示。将管道流场平行与 y 轴切面,观察流场特性,发现速度分布规律大体一致。由于管道结构特点,当 y 为 0.4 m 开始进入弯管阶段,速度开始发生变化,每切面的峰值呈现下降趋势;在 0.6 m 附近(弯管顶端)达到最低值,之后逐渐上升。 L_1 取 0.025 m 时较另外两种情况速度场分布更加均匀。分别初始释放相同数量、速度和颗粒大小(半径 0.02 m)的鲜叶,并利用截面颗粒数统计功能,计算出管道存留的颗粒数量。

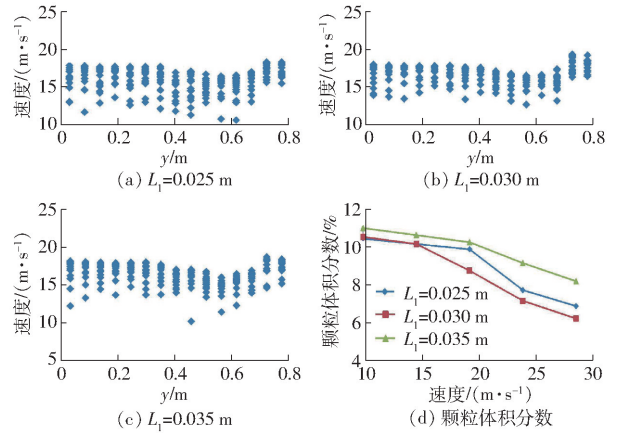


图 10 流场情况与颗粒体积分数

Fig. 10 Flow field and particle volume fraction

当 L_1 取 0.025、0.035 m 时,经过一段时间管内的颗粒体积分数相近,总体小于 L_1 取 0.030 m 时的颗粒体积分数。且速度越大,颗粒体积分数越小。考虑到流场速度和颗粒体积分数, L_1 取 0.030 m 为宜。管道的弯角处半径 R 分别取 0.035、0.040、0.045 m,初始速度为 25 m/s,进行集叶收集模拟,管道中各部分的平均速度随弯管半径 R 变化的关系曲线如图 11 所示。由图 11 可知,其变化趋势与图 10 相似, R 为 0.04 m 时流场速度均值最大。

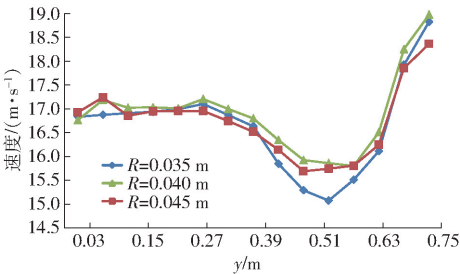


图 11 不同弯管半径的流场速度变化曲线

Fig. 11 Velocity variation of flow field with different bend radii

3.4.4 压降

在集叶机构分析中,需要考虑压降^[26]。图 12 为集叶管道的压降情况。由于鲜叶颗粒流受到离心作用,弯管外侧壁面空气压力大,内侧壁面压力小,

且出现负压。弯管处空气速度出现分层现象,分布规律与压力相反,即弯管外侧速度低、压力大,而内侧速度高、压力小。当鲜叶颗粒浓度达到一定值时,集叶管道压力损失会随着进口速度的增大呈先增大后减小的趋势。结合流场速度云图特点,存在一个最优经济流速(图 12b),此时管道系统达到最低能耗^[27],即进口速度为 25 m/s。

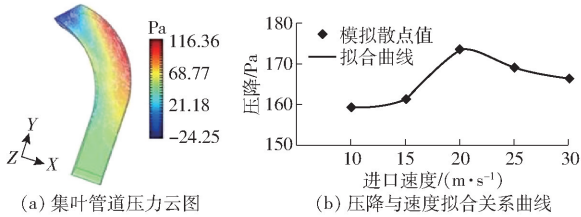


图 12 集叶管道压力分布与拟合关系曲线

Fig. 12 Pressure distribution and fitting curve of leaf collecting pipe

3.4.5 仿真试验

为了达到最佳的集叶效果,需要结合颗粒半径、弯管结构、进口风速等参数进行综合考虑^[28-31]。针对上述的单因素仿真试验,优化结构参数。正交试验因素设计如表 3 所示。

表 3 试验因素

Tab. 3 Test factors and values

水平	因素			
	风速	颗粒半径	弯管半径	L_1 长度
	$A/(m \cdot s^{-1})$	B/m	C/m	D/m
1	10	0.02	0.035	0.025
2	15	0.05	0.040	0.030
3	20	0.08	0.045	0.035
4	25			
5	30			

鲜叶颗粒流在直管段达到稳定后经过 Δt ,根据穿透率 P_{bend} (颗粒体积分数与穿透率对应,是指一定体积内颗粒含量。当某时刻颗粒体积分数高,即为颗粒存留量多,未穿出弯管,则穿透率低;当颗粒体积分数低,则穿透率高),计算进口截面和出口截面的颗粒数比,穿透率计算式为

$$P_{bend} = \frac{N_{b0}}{N_{b1}} \times 100\%$$
 (6)

式中 N_{b0} —— Δt 内弯管进口的颗粒数

N_{b1} —— Δt 内弯管出口的颗粒数

由表 3 可知,其是 3 个 3 水平和 1 个 5 水平 4 因素的试验,因此选用混合型正交表 $L_{18}(6 \times 3^6)$,不考虑因素间的交互作用。但由于此试验只有 3 个 3 水平和 1 个 5 水平,在原正交表的基础上,对因素水平值按“随机”修改处理(表 4)。

表 4 试验设计与结果

Tab. 4 Experimental design and results								
序号	A	B	C	D	P _{bend} /%			
1	1	1	1	1	1	1	1	88.0
2	1	2	2	2	2	2	2	87.3
3	1	3	3	3	3	3	3	86.3
4	2	1	1	2	2	3	3	90.2
5	2	2	2	3	3	1	1	88.9
6	2	3	3	1	1	2	2	87.7
7	3	1	2	1	3	2	3	90.3
8	3	2	3	2	1	3	1	91.4
9	3	3	1	3	2	1	2	88.9
10	4	1	3	3	2	2	1	92.0
11	4	2	1	1	3	3	2	91.5
12	4	3	2	2	1	1	3	90.2
13	5	1	2	3	1	3	2	93.4
14	5	2	3	1	2	1	3	92.2
15	5	3	1	2	3	2	1	90.7
16	6	1	3	2	3	1	2	(空白)
17	6	2	1	3	1	2	3	(空白)
18	6	3	2	1	2	3	1	(空白)
T ₁	261.6	453.9	449.3	449.7				
T ₂	266.8	451.3	450.1	449.8				
T ₃	270.6	443.8	449.6	449.5	T = 1 349			
T ₄	273.7					S _T = 57.89		
T ₅	276.3							
S	44.23	6.12	1.87	1.16				

试验结果方差分析如表 5 所示。由于 $F_{0.95}(2, 7) = 4.74$, 所以在显著性水平 0.05 上因素 A 与 B 是显著的。为使穿透率高, 最佳因素组合是 A_5B_1 , 即风速为 30 m/s, 颗粒半径为 0.02 m。而因素 C 与 D 为非显著, 可选择 C_2D_2 , 即 L_1 取 0.030 m, R 取 0.04 m, 作为试验集叶管道结构参数。

表 5 方差分析
Tab.5 Variance analysis

来源	平方和	自由度	均方和	F
A	44.23	4	11.06	17.12
B	6.12	2	3.06	4.74
C	1.87	2	0.93	1.44
D	1.16	2	0.58	0.90
误差	4.52	7	0.65	

4 试验

将不同机采鲜叶物料群进行分组, 以一定风速分别通过集叶管道。以鲜叶为试验材料, 机采鲜叶满足形态特征或尺寸参数的任一指标即可判断为相应分组, 如芽头组分长度在 0.020 ~ 0.029 m 之间, 一芽一叶组分长度在 0.030 ~ 0.059 m 之间, 一芽二叶组分长度在 0.060 ~ 0.089 m 之间^[10]。风机可提

供风速为 10 ~ 30 m/s。
试验装置如图 13a 所示, 将机采鲜叶物料分选 (图 13b), 一定数量的同类鲜叶在风机作用下, 通过集叶管道后, 观察管道末端的集叶情况。试验结果表明 (表 6), 模型流场模拟数值与试验结果相近。减少横直管长度, 采用特定圆角弯管的集叶管道, 穿透率不小于 86.8%, 满足集叶要求。由于机采鲜叶不同组分之间的长度具有一定差异, 集叶穿透率不等。在相同进口速度下, 鲜叶颗粒小比颗粒大集叶效果好。由表 6 可知, 模拟值均低于试验值, 其原因是模拟时将不规则的颗粒简化为粒径相同的球形, 减小了颗粒形状的不规则性等因素对气固两相流动性能的影响, 减少了能量损耗。

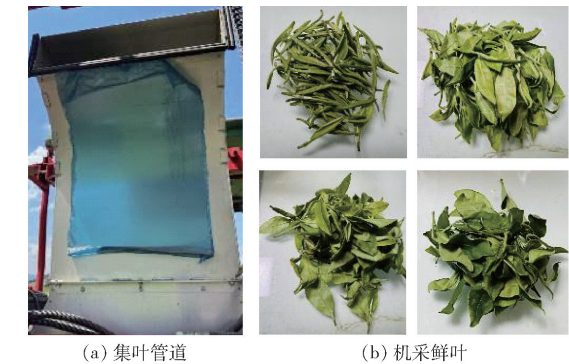


图 13 集叶管道与机采鲜叶

Fig. 13 Collecting pipe and machine to collect fresh leaves

表 6 验证试验结果

Tab.6 Verification experimental results							%
		A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	
试验值	B_1	90.5	92.3	93.3	95.2	95.0	
	B_2	89.8	90.2	92.4	93.3	94.3	
	B_3	87.3	88.9	90.9	91.7	92.5	
模拟值	B_1	89.5	90.8	91.4	93.1	94.1	
	B_2	87.3	89.4	91.5	92.5	93.8	
	B_3	86.8	88.2	89.3	90.2	91.2	

5 结论

- (1) 采用 Lagrange 法进行的气固两相流动数值计算能有效地模拟鲜叶颗粒在管道内的气固两相流动, 且集叶效果与鲜叶风速、颗粒半径、管道结构有关。
- (2) 由于气流受到粘度和边界影响, 管道壁面附近流动变得滞缓, 速度脉动剧烈。速度切面中间速度比四周高, 越靠近管道壁面, 速度越小。鲜叶颗粒在经过弯管段后, 速度出现明显下降, 能量损失增大。进口速度与出口速度呈正相关, 但当进口速度大于 25 m/s, 出口速度增加率变小。
- (3) 进料量对鲜叶颗粒的平均速度影响不大, 但因质量不一致, 受到重力的作用, 半径大的鲜叶颗

粒易出现在横直管道的下层,即颗粒半径增大,管道内沉积量增大。为提高集叶效果,通过减小水平横直管道长度,可有效避免此现象。

(4)在同等竖直管道长度下,方管壁面阻碍了颗粒流的转弯流动,使得大量颗粒不能顺利到达横管道。与圆角弯管相比,大大增大了沉积量。选择圆角弯管,更适合集叶要求。由数值模拟可知,鲜叶颗粒进入进口,受风力影响速度提高,随后进入弯管,致使速度降低,并在 0.6 m 附近(弯管顶端)达到最低值。颗粒通过弯管后,在风力的

影响下再一次加速上升。 L_1 为 0.030 m 和 R 为 0.04 m 时颗粒体积分数较小,且流场速度均值最大。

(5)选用弯管半径为 0.04 m 圆角弯管的集叶管道,鲜叶穿透率不小于 86.8%,满足集叶要求。同时在弯管设计的基础上,通过统计学方法进一步证实鲜叶风速和颗粒半径更显著影响集叶的效果。当鲜叶颗粒半径增加,可适当提高进口速度。结合流场速度云图和压降等特性分析,最优经济进口速度为 25 m/s。

参 考 文 献

- [1] 欧阳爱国,邵福,刘燕德,等. 一种单轨悬挂式采茶机结构设计及通风管流场仿真分析[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(20):236-240.
- [2] 罗泽涌,陈建,方晶晶,等. 我国丘陵山区茶园种植机械化现状与发展研究[J]. 农机化研究, 2020, 42(2):1-7.
LUO Zeyong, CHEN Jian, FANG Jingjing, et al. Current situation and development suggestions of tea garden planting mechanization in hilly and mountainous areas[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(2):1-7. (in Chinese)
- [3] 权启爱. 茶叶机械标准化与茶叶机械标准[J]. 中国茶叶, 2012, 34(4):14-16.
- [4] 宋扬扬,李为宁,李兵,等. 履带式智能采茶机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2020, 42(8):123-127.
SONG Yangyang, LI Weining, LI Bing, et al. Design and test of crawler type intelligent tea picker[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(8):123-127. (in Chinese)
- [5] 韩余,肖宏儒,秦广明,等. 自走式采茶机液压系统的设计和试验研究[J]. 茶叶科学, 2014(6):548-556.
HAN Yu, XIAO Hongru, QIN Guangming, et al. Design and test for hydraulic system of self-propelled tea plucker[J]. Journal of Tea Science, 2014(6):548-556. (in Chinese)
- [6] 汤一平,王伟羊,朱威,等. 基于机器视觉的茶陇识别与采茶机导航方法[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1):45-50.
TANG Yiping, WANG Weiyang, ZHU Wei, et al. Tea ridge identification and navigation method for tea-plucking machine based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1):45-50. (in Chinese)
- [7] 杜哲,胡永光,王升. 便携式采茶机切割器运动仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊):221-226.
DU Zhe, HU Yongguang, WANG Sheng. Simulation and experiment of reciprocating cutter kinematic of portable tea picking machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.):221-226. (in Chinese)
- [8] 姚正钢,倪崇本,姚雯. 结构风管通风分析与优化研究[J]. 造船技术, 2016(5):82-88.
YAO Zhenggang, NI Chongben, YAO Wen. Research on air distribution and optimization of structural air duct [J]. Marine Technology, 2016(5):82-88. (in Chinese)
- [9] 沈雪敏. 超大型风机管道及航空发动机试验舱强度数值分析及结构改进设计[D]. 北京:北京化工大学, 2018.
SHEN Xuemin. Strength numerical analysis and structure improvement design of super-large fan pipes and test cabin for aviation engines[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018. (in Chinese)
- [10] 王荣扬. 柔性片状物料气固耦合数值计算及机采茶鲜叶分选装置试验研究[D]. 杭州:浙江理工大学, 2020.
WANG Rongyang. Numerical simulations of gas-solid coupling mechanism of flexible flaky materials and experimental studies of the sorting equipment for machine-plucked fresh tea leaves[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2020. (in Chinese)
- [11] QIAN F P, HUANG N J, LU J L, et al. CFD-DEM simulation of the filtration performance for fibrous media based on the mimic structure[J]. Computers and Chemical Engineering, 2014, 71:478-488.
- [12] YANG S, LUO K, ZHANG K, et al. Numerical study of a lab-scale double slot-rectangular spouted bed with the parallel CFD-DEM coupling approach[J]. Powder Technology, 2015, 272:85-99.
- [13] IQBAL N, RAUH C. Coupling of discrete element model (DEM) with computational fluid mechanics (CFD): a validation study[J]. Applied Mathematics and Computation, 2016, 277:154-163.
- [14] 刘鹏,何进,章志强,等. 基于 CFD-DEM 的秸秆还田机碎秆运动特性分析与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1):244-253.
LIU Peng, HE Jin, ZHANG Zhiqiang, et al. Kinematic characteristic analysis and field test of chopped stalk in straw retention machine based on CFD-DEM coupling simulation method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.1):244-253. (in Chinese)
- [15] 黄震宇,李腾,喻志成,等. 蔬菜种子风力筛选机分离室气固两相流模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5):70-76.
HUANG Zhenyu, LI Teng, YU Zhicheng, et al. Simulation and experiment of gas-solid two-phase flows in separation chamber

- of air-screening machine for vegetable seeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5):70–76. (in Chinese)
- [16] 雷小龙, 廖宜涛, 张闻宇, 等. 油麦兼用气送式集排器输种管道气固两相流仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3):57–68.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, ZHANG Wenyu, et al. Simulation and experiment of gas-solid flow in seed conveying tube for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3):57–68. (in Chinese)
- [17] 张宪, 杨韬, 乔欣, 等. 风道口流场对茶叶漂移轨迹及风选质量影响分析[J]. 茶叶科学, 2013, 33(1):60–66.
ZHANG Xian, YANG Tao, QIAO Xin, et al. Study on effect of air inlet flow field on the tea particles drift distance and quality of wind-selecting[J]. Journal of Tea Science, 2013, 33(1):60–66. (in Chinese)
- [18] 张灿凤. 空调通风管理颗粒物沉降规律数值模拟研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2014.
ZHANG Canfeng. Particulate matter deposition regularity in air conditioning ventilation ducts[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2014. (in Chinese)
- [19] VASHISTH S, GRACE J R. Simulation of granular transport of geldart type – A, – B, and – D particles through a 90° elbow [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, 51(4):2030–2047.
- [20] EBRAHIMI M, CRAPPER M, OOI J Y. Experimental and simulation studies of dilute horizontal pneumatic conveying[J]. Particulate Science and Technology, 2014, 32(2):206–213.
- [21] KRUGER T, VARNIK F, RAABE D, et al. Efficient and accurate simulations of deformable particles immersed in a fluid using a combined immersed boundary lattice boltzmann finite element method[J]. Comput. Math. Appl., 2011, 61(12):3485–3505.
- [22] GOMPPER G, KROLL D M. Random surface discretizations and the renormalization of the bending rigidity[J]. Journal De Physique I, 1996, 6(10):1305–1320.
- [23] 罗志国, 倪冰, 陈韧, 等. 水平气力输送管中颗粒浓度分布的数值模拟[J]. 过程工程学报, 2008, 8(增刊1):59–63.
LUO Zhiguo, NI Bing, CHEN Ren, et al. Numerical study of particle phase volume fraction in the horizontal pneumatic conveying pie[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2008, 8(Supp. 1):59–63. (in Chinese)
- [24] 彭文山, 曹学文. 管道参数对液/固两相流弯管流场及冲蚀影响分析[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2016, 36(1):87–96.
PENG Wenshan, CAO Xuwen. Influence of pipe parameters on flow field of liquid – solid two-phase flow and erosion of pipe bend[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2016, 36(1): 87–96. (in Chinese)
- [25] 韩云龙, 殷传慧, 胡永梅. 通风管道结构形式对颗粒物沉积的影响[J]. 过程工程学报, 2015, 15(1): 40–44.
HAN Yunlong, YIN Chuanhui, HU Yongmei. Effect of ventilation duct structure on deposition of particles[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2015, 15(1):40–44. (in Chinese)
- [26] 陆永光, 胡志超, 林德志, 等. 基于CFD-DEM花生荚果管道输送过程数值模拟[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(6): 104–109.
LU Yongguang, HU Zhichao, LIN Dezhi, et al. Numerical simulation of peanuts particles conveying in pipeline using CFD – DEM coupled approach[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(6):104–109. (in Chinese)
- [27] 林金贤, 林棋, 娄晨, 等. 气固两相流管道流动阻力特性数值模拟[J]. 油气储运, 2014, 33(1):32–41.
LIN Jinxian, LIN Qi, LOU Chen, et al. Numerical simulation of flow drag characteristics of gas-solid two-phase flow in pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(1):32–41. (in Chinese)
- [28] ARYEI A, HASHEMNIA K, JAFARPUR K. Experimental and numerical study of ball size effect on restitution coefficient in low velocity impacts[J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(10):1037–1044.
- [29] 马爱纯, WILLIAMS K C, 周子民, 等. 气力输送管道压降预测影响的数值模拟研究[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(23):13–16.
MA Aichun, WILLIAMS K C, ZHOU Jiemin, et al. Numerical simulation of some effects on pressure drop predicting in pneumatic transport[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(23):13–16. (in Chinese)
- [30] 王伯凯, 于昭洋, 胡志超, 等. 花生捡拾收获机三风系风选系统流场数值模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11):103–113.
WANG Bokai, YU Zhaoyang, HU Zhichao, et al. Numerical simulation and experiment of flow field in three air systems of air separation system of peanut pickup harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11):103–113. (in Chinese)
- [31] 李衍军, 刘瑞, 刘春晓, 等. 气送式排种器输种管内种子速度耦合仿真测定与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 54–61, 133.
LI Yanjun, LIU Rui, LIU Chunxiao, et al. Simulation and test of seed velocity coupling in seed tube of pneumatic seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4):54–61, 133. (in Chinese)