

李光, 崔诗彬, 寇雷, 等. 基于离散元的烟丝输送模拟与管道优化研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2026, 57(3):000-000.

LI G, CUI S B, KOU L, et al. Tobacco shreds conveying simulation and pipeline optimization based on discrete element method[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2026, 57(3):000-000.

基于离散元的烟丝输送模拟与管道优化研究

李光¹, 崔诗彬¹, 寇雷², 陈松², 黄利强¹

(1. 天津科技大学轻工科学与工程学院, 天津 300457; 2. 上海烟草集团有限责任公司 天津卷烟厂, 天津 300163)

摘要:[目的]为提高离散元法对烟丝输送弯管优化设计的准确性和可靠性, 建立X-Y-Z三维异形破碎模型, 并在此基础上采用气固耦合法(CFD-DEM)对弯管结构进行优化设计。[方法]以烟厂红双喜(硬)烟丝为对象, 通过重球跌落试验等测定破碎模型的主要参数。以管道弯曲角度、弯曲半径、进出口长度比为关键试验因素, 管道的磨损情况和烟丝颗粒剩余Bond键占比情况为试验指标, 分析各因素对烟丝输送成本的影响规律。[结果]管道总磨损量随着弯曲角度及弯曲半径的增大而减小; 不同管道进出口长度比的管道磨损程度为 $1:1.5 < 1:1 < 1.5:1$ 。烟丝颗粒剩余Bond键占比随着弯曲角度的增大而增大; 随着弯曲半径的增大而先减小后增大; 不同管道进出口长度比的烟丝破碎程度为 $1:1.5 < 1:1 < 1.5:1$ 。利用正交试验可得影响烟丝质量的主次因素依次为管道进出口长度比、弯曲半径和弯曲角度, 管道最优因素组合为弯曲角度 150° 、弯曲半径 1500 mm 、进出口长度比 $1:1.5$, 此时 10 g 烟丝颗粒在最优组合的弯管输送的仿真破碎量为 1.505% , 对弯管最优因素组合进行实际烟丝破碎验证可得实际破碎量为 1.333% , 相对误差为 0.172% 。比一般工况下弯管输送烟丝的实际破碎量减少约 3.074% , 有效降低卷烟输送成本。[结论]优化后的弯管结构降低了气力输送后烟丝的破碎量, 研究结果可为管道的合理布置方式、弯管优化设计提供理论基础。

关键词:烟丝; 离散元; 破碎模型; 数值模拟; 结构优化

中图分类号: TS43

文献标志码: A

文章编号: 1000-1700(2026)03-0000-11

Tobacco Shreds Conveying Simulation and Pipeline Optimization Based on Discrete Element Method

LI Guang, CUI Shibin, KOU Lei, CHEN Song, HUANG Liqiang

(1. School of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China;

2. Tianjin Cigarette Factory, Shanghai Tobacco Group Co., Ltd., Tianjin 300163, China)

Abstract:[Objective]To improve the accuracy and reliability of the discrete element method in optimizing the design of tobacco shred conveying elbows, an X-Y-Z three-dimensional irregular breakage model was established. Based on this, a gas-solid coupling method (CFD-DEM) was employed to optimize the elbow structure design. [Methods]Taking Hongshuangxi (Hard) tobacco shreds from a cigarette factory as the research object, the key parameters for the breakage model were measured through methods such as the heavy-ball drop test. With the pipe bending angle, bending radius, and inlet-outlet length ratio as critical experimental factors, and the pipeline wear condition and the remaining Bond key ratio of tobacco shred particles as experimental indicators, the influence of each factor on tobacco shred conveying costs was analyzed. [Results]The total pipeline wear decreased with increases in both the bending angle and bending radius. The degree of pipeline wear for different inlet-outlet length ratios followed the order: $1:1.5 < 1:1 < 1.5:1$. The remaining Bond key ratio of tobacco shred particles increased with the increase of the bending angle; it first decreased and then increased with the increase of the bending radius; and the degree of tobacco shred breakage for different inlet-outlet length ratios followed the order: $1:1.5 < 1:1 < 1.5:1$. The orthogonal experiments revealed that the order of the factors affecting tobacco shred

收稿日期(Received): 2025-10-20 修回日期(Revised): 2025-12-25 接受日期(Accepted): 2026-01-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC2105503)

第一作者: 李光(1975-), 男, 博士, 副教授, 从事包装机械、数值模拟与仿真方向研究, E-mail: guangl@tust.edu.cn

quality were: the inlet-outlet length ratio, bending radius, and bending angle. The optimal factor combination for the pipeline was a bending angle of 150°, a bending radius of 1 500 mm, and an inlet-outlet length ratio of 1:1.5. Under this condition, the simulated breakage rate for 10 g of tobacco shred particles during conveying was 1.505%. The verification test of the breakage rate of this optimal combination yielded an actual breakage rate of 1.333%, with a relative error of 0.172%. Compared with the actual breakage rate under general operating conditions for elbow conveying, it was reduced by 3.074% approximately, effectively lowering the cigarette conveying costs. **[Conclusion]**The optimized elbow structure reduces the breakage of tobacco shreds after pneumatic conveying. The research findings can provide a theoretical basis for the rational layout of pipelines and the optimized design of elbows.

Key words: tobacco shreds; discrete element method; breakage model; numerical simulation; structural optimization

在卷烟生产中,烟丝的输送成为将各个阶段相连的重要手段,气力输送被广泛应用在卷烟工业中^[1]。在气力输送系统的流场运动中,烟丝受气固两相流的作用力,加剧了烟丝之间、烟丝与运输管壁间的碰撞,导致烟丝碎丝率增加,给卷烟质量带来严重负面影响^[2],增加生产成本。通过建立烟丝离散元及气力输送数值模型,实现烟丝气力输送的可视化模拟研究,降低研究成本。

由于多相流模拟存在信息耦合交换,以往烟丝的相关研究为提高计算效率采用简单的模型进行烟丝的模拟,忽略了烟丝自身结构对流场运动的干扰。张皓天^[3]提出一种采用多个不同尺寸球体重叠构成的棒状烟丝模型;王怀等^[4]将烟丝颗粒分为两种模型,除上述棒状结构外,还提出采用球形颗粒填充的扁平长方体模型。而实际烟丝作为柔性、易变形的颗粒,常呈现弯曲或扭曲等复杂形态^[5]。OSCHMANN 等^[6]通过数值模型研究了流化床内拉长型颗粒(如圆柱体、平板及长方体)的平均颗粒取向;李光等^[7]则在 X-Y 平面构建了不规则烟丝模型,用于研究风送环境中仿真结果的可靠性,以上研究均表明仿真建模与实际颗粒形状相似程度对仿真结果有较大影响。

在烟丝气力输送系统中,弯管处是导致烟丝破碎和管道磨损加剧的关键区域^[8]。基于卷烟厂现有的弯管结构,本研究采用 CFD-DEM 气固耦合仿真模拟,建立 X-Y-Z 三维空间中具有不规则形态的烟丝模型,并引入 Bonding_v1 颗粒黏结模型,系统研究弯曲角度、弯曲半径及进出口长度比例等因素对烟丝剩余 Bond 键占比以及管道磨损的影响程度^[9],从而在降低烟丝破碎率的同时减轻弯管关键区域的磨损,为输送管道的合理布局与弯管结构优化提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料及仪器

材料:取自天津卷烟厂 6 号送丝机 54#“红双喜(硬)”卷烟烟丝。主要仪器设备:电子天平(JY3002,上海精密科学仪器)、震动筛分机(ZS-200 型)、落球冲击试验机(DR-7017,东日仪器)。

1.2 烟丝物理模型的确立

烟丝形态各异且易碎,烟丝宽度一般为 1 mm,厚度约为 0.25 mm,长度 0~50 mm。取 5 组 10 g 烟丝,使用不同目数的筛网对烟丝样品进行长度分类^[10],筛分结果如表 1,各种烟丝长度代表如图 1。在使用 SolidWorks 对不同长度的烟丝代表进行建模时,主要考虑到烟丝在边缘不规则的同时,由于烟丝烘制导致的水分流失,烟丝会发生不同程度的弯折和扭曲。因此在烟丝建模时考虑在 X-Y-Z 3 方向立体空间下有不同程度的异形,5 种烟丝模型如图 2。

表 1 5 种烟丝长度分类结果

Table 1 Tobacco cut length classified into five categories

项目 Item	分类/mm Classification				
	0~3	3~9	9~15	15~35	>35
重量占比/% Weight percentage	0.29	2.73	8.03	31	57.95
烟丝代表长度/mm Representative cut length	3	5	13	35	45
序号 Serial number	a	b	c	d	e



图1 5种长度烟丝代表

Figure 1 Five lengths of tobacco represent

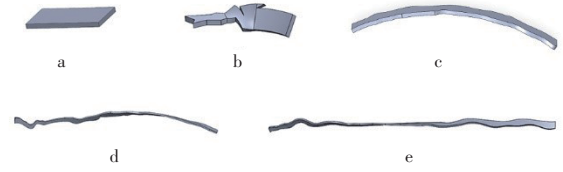


图2 5种代表烟丝模型

Figure 2 Five types of representative tobacco models

1.3 基于气固耦合的数学模型的构建

气固两相流模型常用于模拟气体介质中固体颗粒的运动特点及其相互间的作用^[11]。在卷烟输送系统中,连接于管道的风机产生具有一定压力与速度的气流,推动烟丝颗粒在管道内移动,该过程符合气固两相流动的基本特征。欧拉模型在处理连续介质流动问题时具有形式简洁、适用性强的优点,常用于描述气相这类连续相流场^[12-13]。而拉格朗日模型则基于拉格朗日参考框架,通过直接积分运动微分方程追踪离散颗粒的运动轨迹,精确刻画颗粒的瞬态行为^[14]。在分析管道内烟丝输送的过程时,通常烟丝颗粒相使用拉格朗日离散元法进行追踪,气相采用基于欧拉框架的连续介质模拟^[15-16],还需综合考虑气流与颗粒之间的曳力作用以及颗粒相互碰撞等的耦合效应。本研究采用CFD-DEM气固耦合方法,并在欧拉-拉格朗日体系下构建数值模型。

1.3.1 气相数学模型 气相模型是以流体力学原理为基础,通过求解控制流体运动的方程来分析流动规律^[17]。气相控制方程主要包括连续性与动量方程^[18]:

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla \rho_g u_i = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_g u_i}{\partial t} + \nabla \rho_g u_i u_j = -\nabla p + \nabla \alpha_g \tau_{ij} + \rho_g g_i + F_{qs} \quad (2)$$

式中: ρ_g 为气相密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$); u_i 为气相在笛卡尔*i*坐标方向的速度分量($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); u_j 为气相在笛卡尔*j*坐标方向的速度分量($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); α_g 为气相体积分数(%); τ_{ij} 为气相黏性应力张量(Pa); g_i 为*i*方向的体积力(N); F_{qs} 为气固两相间的作用力(N)。

1.3.2 固相数学模型 在气力输送过程中烟丝的运动状态受压力差影响,其颗粒相速度随时间发生变化,表现出变加速运动特性。烟丝颗粒的不规则性导致颗粒表面受力不均出现翻转的现象。根据牛顿第二定律,可建立烟丝颗粒的运动控制方程^[11]:

$$m \frac{dv}{dt} = mg + F_p + \sum F_{ij} \quad (3)$$

$$I \frac{d\omega}{dt} = \sum_{j=1}^n (M_{ij} + M_{rij}) \quad (4)$$

式中: m 为颗粒质量(kg); v 为颗粒速度($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); F_p 为流体作用于颗粒的力(N); F_{ij} 为颗粒间的作用力(N); I 为颗粒转动惯量($\text{kg}\cdot\text{m}^2$); ω 为烟丝的旋转角速度($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$); n 为与颗粒接触数; M_{ij} 为烟丝颗粒间的接触力矩($\text{N}\cdot\text{m}$); M_{rij} 为气体对烟丝产生的力矩($\text{N}\cdot\text{m}$)。

1.3.3 冲蚀磨损模型 基于磨损机理,烟丝颗粒输送过程中与管壁发生的碰撞与滑动磨损为冲蚀磨损,选用Archard磨损模型能够以磨损量表示单位面积的磨损深度,磨损系数选取 6×10^{-6} 。Archard方程^[18]:

$$h = \frac{WF_n d_t}{A} \quad (5)$$

式中: h 为磨损深度(mm); W 为磨损系数; F_n 为法向接触力(N); d_t 为切向滑动距离(mm); A 为接触面积(mm^2)。

1.3.4 气固两相流边界条件 在气相模拟中,选用Fluent中的Standard k-epsilon湍流模型对流场进行求解,固相计算采用EDM软件中的Bonding黏结模型模拟烟丝破碎情况。模拟质量流量为 $1 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 的10 g烟丝在 $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速下在管道中的运动状况。CFD-DEM模拟的物理参数和数值参数^[19]如表2。

表2 仿真模拟参数

Table 2 Simulation parameters

材料 Material	参数 Parameter	数值 Value
空气 Air	密度 Density/(kg·m ⁻³)	1.225
	泊松比 Poisson's ratio	0.35
烟丝颗粒 Tobacco particle	密度 Density/(kg·m ⁻³)	585
	弹性模量 Elastic modulus/Pa	5.75×10 ⁶
	泊松比 Poisson's ratio	0.33
铝管道 Aluminum pipe	密度 Density/(kg·m ⁻³)	2 700
	弹性模量 Elastic modulus/Pa	2.6×10 ¹⁰
颗粒-颗粒 Particle-Particle	恢复系数 Recovery coefficient	0.35
	静摩擦系数 Static friction coefficient	0.49
	动摩擦系数 Dynamic friction coefficient	0.03
	恢复系数 Recovery coefficient	0.35
颗粒-管道 Particle-Pipe	静摩擦系数 Static friction coefficient	0.44
	动摩擦系数 Dynamic friction coefficient	0.12

1.3.5 烟丝离散元模型的建立 烟丝造碎是烟丝输送中的重要参数指标。本课题基于离散元模型,为研究烟丝在管道中的运动,且降低运算负担,在EDEM中以单一元颗粒在黏结键作用下^[20]单层填充构建Hertz-Mindlin离散元模型。采用Bonding黏结理论、Bonding_v1破碎模型构建烟丝破碎模型,以Bond键的断裂进行烟丝造碎表征。

在API插件中输入5种离散元模型的填充元颗粒(X、Y、Z)坐标、颗粒替换数量、颗粒替换名称、发生颗粒替换的时间等,使得生成的离散元颗粒发生替换且颗粒间被Bond键黏结。设置填充元颗粒半径为0.11 mm,5种烟丝模型填充颗粒数量分别为84,92,206,517,686个。颗粒替换后的颗粒分布与Bond键黏结情况如图3。

1.3.6 烟丝破碎模型参数标定 由于烟丝细短且易脆,经预试验后,得出其特性无法满足三点弯曲、单轴压缩及巴西劈裂等常规破碎参数标定试验对试样的要求。故采用重球跌落试验进行烟丝破碎参数的标定研究^[21],以烟丝在冲击点处的破碎状态表征破碎模型的力学性能。

用32.5 g半径为10 mm的小钢球、落球冲击试验机分别在50~350 mm 7个高度对随机的烟丝样品进行10次跌落试验,观察烟丝的破碎情况,重球跌落试验示意图如图4,破碎情况汇总如表3。

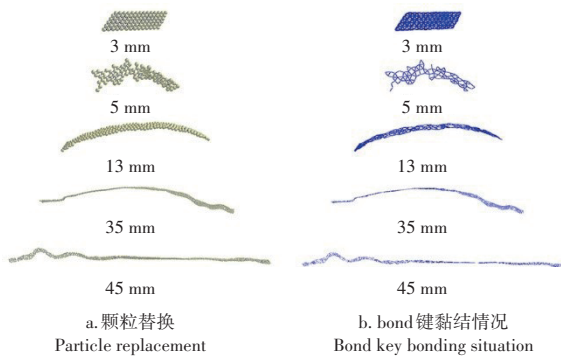


图3 API颗粒替换示意图

Figure 3 API granularity replacement diagram

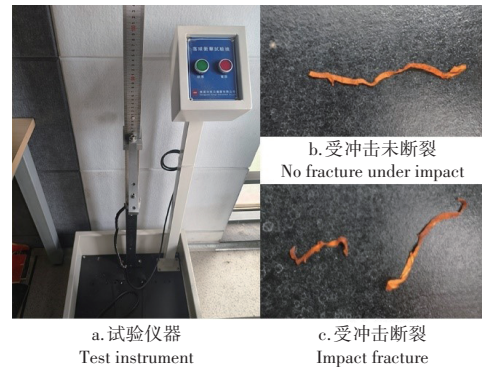


图4 重球跌落试验示意图

Figure 4 Schematic of the heavy ball drop experiment

表3 重球跌落试验结果统计

Table 3 Statistical Table of heavy ball drop test results

次数 Number	高度 Height/mm						
	50	100	150	200	250	300	350
跌落次数 Number of drops	10	10	10	10	10	10	10
断裂次数 Number of breaks	2	4	5	7	8	10	10

由表 3 可知,烟丝样品被 300 mm 及更高处的小钢球自由下落冲击后,10 个样品全部断裂。在 EDEM 中进行仿真模拟破碎参数标定时,选用 50~300 mm 6 个高度的小球对烟丝颗粒模型左右两端和中部 3 个点位分别进行初速度为 0 的自由落体冲击仿真,调整黏结参数数值使得仿真结果与真实试验数据吻合,并同步记录相关数据。EDEM 中五种烟丝离散元模型在中部位点 250 mm 和 300 mm 处颗粒破碎情况和 Bond 键黏结情况如图 5。烟丝颗粒破碎模型黏结参数设置调整结果如表 4。

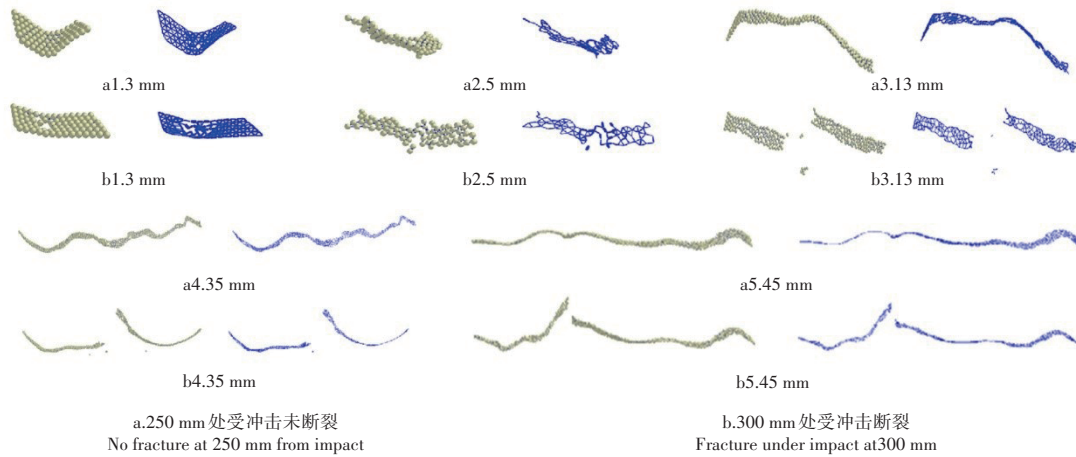


图5 颗粒模型破碎情况示意图

Figure 5 Schematic diagram of particle model breakage

表4 Bonding_v1参数设置

Table 4 Bonding_v1 parameter setting

参数 Parameter	数值 Value
单颗粒半径 Single particle radius/mm	0.11
黏结半径 Bonding radius/mm	0.16
单位法向刚度 Unit normal stiffness/(N·m ⁻³)	4.62×10 ⁸
单位剪切刚度 Unit shear stiffness/(N·m ⁻³)	1.62×10 ⁸
临界法向力 Critical normal force/Pa	1.2×10 ⁵
临界切向力 Critical shear force/Pa	1×10 ⁵
Bond 键生效时间 Bond key effective time/s	0.05

1.4 典型工况选取

以天津卷烟厂的风力送丝系统数据为主要仿真参考。由于喂丝机到卷烟机管口直径固定,故在本研究探究管道的合理布置方式、弯管优化设计时管径不变,即外径 140 mm,内径 130 mm。主要对于烟厂弯曲半径为 1 200 mm、弯曲角度 90°的定制弯管连接一定长度的直管,总长为 3 500 mm 的直弯管组合进行结构优化设计的研究,探究烟丝颗粒在由水平直管段经弯管段转向竖直直管段的输送过程中,从弯曲角度、弯曲半径及进出口长度比分析不同因素对烟丝破碎率、管道磨损的影响程度,选取工况情况如表 5。为确保 Fluent 与 EDEM 耦合仿真中数据传递的准确性,Fluent 的时间步长需设置为 EDEM 时间步长的整数倍。本研究中 Fluent 的网格尺寸为 30 mm,时间步长为 6×10⁻⁴ s,每计算 20 个时间步保存一次数据,单个工况计算 600 个时间步;EDEM 采用 6×10⁻⁷ s 作为时间步长,数据保存间隔设为 0.01 s,总仿真时长为 0.36 s。

表5 数值模拟工况

Table 5 Numerical simulation conditions

工况 Working condition	弯曲角度/(°) Bending angle	弯曲半径/mm Bending radius	进出口长度比 Inlet and outlet length ratio	进出口长度/mm Import and export length
1	90	1 200	1:1	1 750, 1 750
2	120	1 200	1:1	1 750, 1 750
3	150	1 200	1:1	1 750, 1 750
4	90	900	1:1	1 750, 1 750
5	90	1 500	1:1	1 750, 1 750
6	90	1 200	1:1.5	1 400, 2 100
7	90	1 200	1.5:1	2 100, 1 400

2 结果与分析

2.1 不同因素对管道磨损的影响

烟丝在管道的磨损情况取决于烟丝颗粒与管壁的碰撞情况^[22],以工况 1 为例,烟丝群触碰管壁时的速度云图与多颗粒烟丝轨迹如图 6。在气力输送过程中,烟丝颗粒经过弯管段时,在惯性及离心力作用下,颗粒撞击弯管外壁导致该部位形成集中磨损区。随着弯曲角度增加,系统最大磨损深度逐渐降低,且最大磨损区域呈现向后迁移的趋势。弯曲角度为 90°、120°、150°时,烟丝颗粒与管壁发生最大磨损的时间分别为 0.14, 0.17, 0.2 s,管道最大磨损深度分别为 1.73×10^{-4} , 1.70×10^{-4} , 1.09×10^{-4} mm。这是由于较小弯曲角度下,烟丝颗粒以较高速度和更接近垂直的撞击角度冲击管壁,加剧了颗粒与壁面的碰撞强度,导致磨损深度较大;而随着弯曲角度的增加,气流方向变化更为平缓,颗粒与壁面的碰撞频率降低,磨损程度相应减轻。不同弯曲角度的烟丝气力输送管道的最大磨损处如图 7。

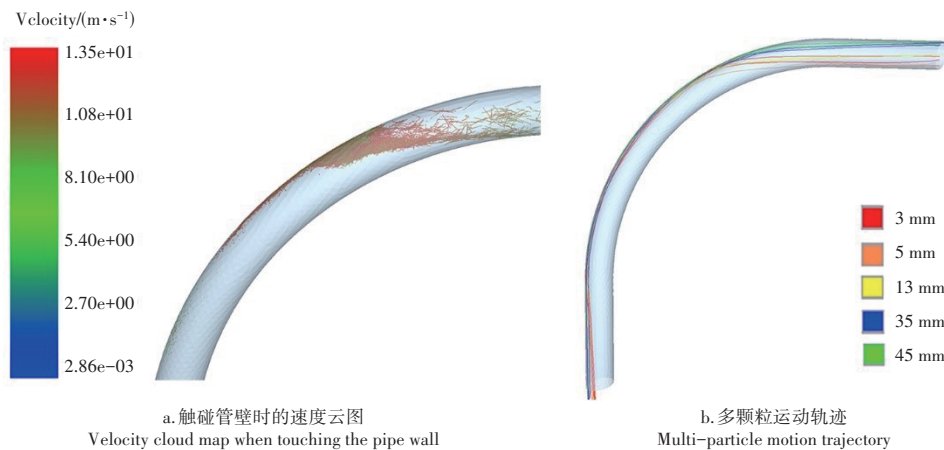


图6 工况1的烟丝颗粒运动状态示意图

Figure 6 Schematic diagram of the motion state of tobacco particles in condition 1

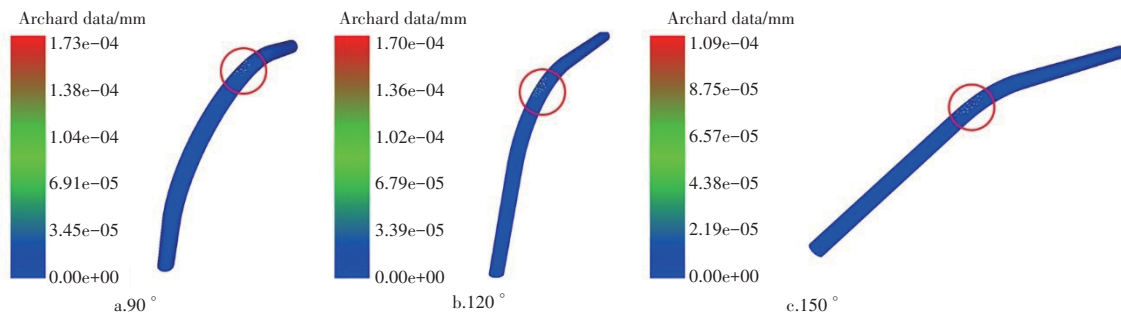


图7 不同弯曲角度下输送管道的最大磨损位置示意图

Figure 7 Maximum wear locations at different pipe bend angles

由图 8 可知,烟丝颗粒通过管道的整个过程中,单位时间内的总磨损量呈先上升后下降的趋势。烟丝在直管段部分颗粒与管壁之间主要发生滑动摩擦,而弯管段处烟丝与弯管外壁发生垂直或切向碰撞加剧磨损。由图 8a 可知,随着管道弯曲角度的增加,烟丝颗粒在管道出口处(0.36 s 时)总磨损量呈降低趋势。这是由于弯曲角度越小,气流方向在较短的弧长内急剧变化,颗粒因惯性较大难以跟随气流运动,更易脱离流线导致高速垂直撞击外侧壁;而弯曲角度增大时管道转向变得平缓,烟丝颗粒有更充分的时间调整轨迹,碰撞概率降低,总磨损量减少。由图 8b 可知,随着弯曲半径的增大,整个管道总磨损量也逐渐减小,单位时间磨损量变化率峰值出现的先后顺序依次为:1 500, 1 200, 900 mm。较小弯曲半径的弯管连接更长的直管段,颗粒在进入弯管前经历较长的加速过程,颗粒碰撞能量和频率提高,总磨损量增大。由图 8c 可知,不同进出口长度比下,比例为 1.5:1 时磨损率峰值出现最晚,总累积磨损量最大;1:1 时磨损有所减轻;1:1.5 时磨损速率峰值

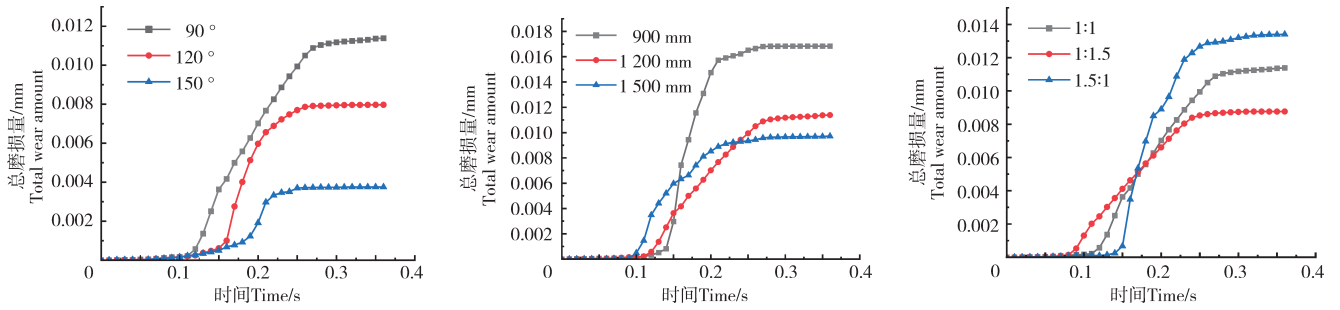


图8 不同因素下总磨损量随时间变化示意图

Figure 8 Schematic diagram of the total wear amount with time under different factors

最先出现,总体磨损程度最小。烟丝颗粒通过进出口长度比为1:1.5,1:1,1.5:1的管道过程中,颗粒团首次撞击管壁的颗粒平均速度分别为 $10.8, 12.2, 13.47 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在单一变化条件下,较大的进口段长度延长了颗粒在直管中的加速距离,导致颗粒以更高速度撞击管壁,碰撞频率与总次数增加,累积磨损量增大。

2.2 不同因素对烟丝颗粒破碎的影响

烟丝颗粒在输送过程中的破碎主要产生于颗粒之间和颗粒与管壁之间的碰撞作用。通过监测CFD-DEM中生成的每个烟丝离散元模型中元颗粒之间黏结键(Bond)的剩余比例,对烟丝破碎进行仿真与分析。由图9可知,烟丝颗粒的剩余Bond键占比随时间推移先下降后逐渐趋于平缓。这是由于烟丝与管壁的冲击动能远大于滑动动能,更易引发黏结键的断裂。由图9a可知,随着管道弯曲角度的增加,烟丝颗粒在0.36 s时的剩余Bond键占比呈增大趋势。在烟丝颗粒与 120° 和 150° 弯曲角度的弯管管壁碰撞时的单位时间内剩余Bond键占比变化量小于 90° 弯管;通过弯管后,剩余Bond键占比变化量大于 90° 弯管。这是由于弯曲角度增大,颗粒经历更平缓的多次碰撞,二次流和湍流作用更显著,颗粒间碰撞概率增加;而弯曲角度小的管道碰撞应力更集中,总动能较大,但颗粒间碰撞概率小。由图9b可知,随着弯转半径的增大,烟丝颗粒在0.36 s时的剩余Bond键占比先减小后增大。随着弯曲半径增大,烟丝颗粒在弯管段的输送距离增加,与管壁摩擦时间增加,导致Bond键断裂增多。当弯曲半径增大至1500 mm时,离心力作用减弱,颗粒与壁面的摩擦作用相对较小,因此剩余Bond键占比出现回升。由图9c可知,不同进出口长度比下,0.36 s时烟丝颗粒剩余Bond键占比从高到低依次为:1:1.5>1:1>1.5:1。当进口段较长时,烟丝颗粒在重力作用下出现沉降,下沉的颗粒与管道壁面的碰撞多垂直于壁面,冲击力更集中,颗粒堆积形成颗粒间的挤压与碰撞,更易导致元颗粒间的Bond键断裂。较高的剩余Bond键占比表明烟丝宏观结构完整性保持较好,整体烟丝团破碎率低。

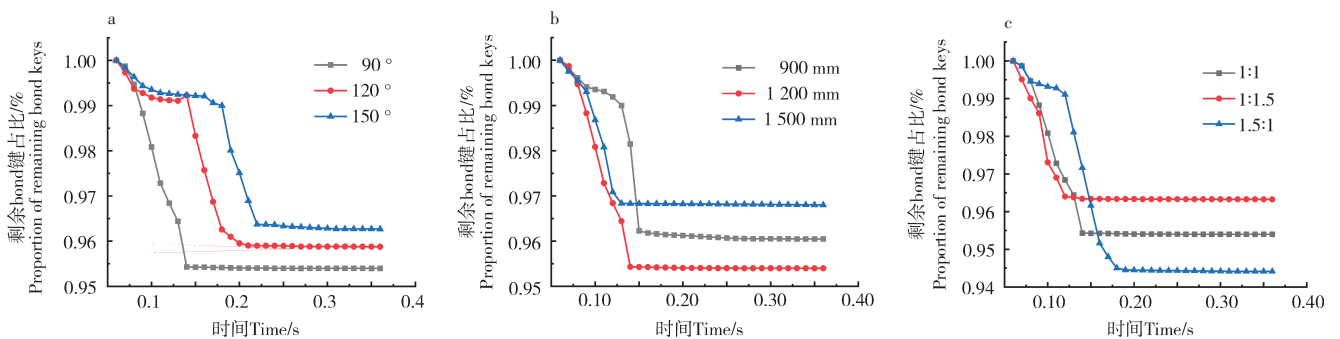


图9 不同因素下颗粒剩余Bond键占比随时间变化示意图

Figure 9 Schematic diagram of the variation of Bond key ratio with time under different factors

2.3 基于烟丝质量的管道最佳结构探究

在烟丝气力输送过程中,烟丝的破碎情况是至关重要的质量检测标准,故以离散元破碎模型中的Bond键断裂占比作为评价指标,以弯曲角度 A 、弯曲半径 B 、进出口长度比 C 进行三因素三水平的正交方案设计正交试验进行最佳管道优化探究,其因素水平表及正交试验结果如表6和表7。

表6 烟丝输送质量影响的因素水平

Table 6 Factor and level table for the influence of tobacco shred conveying quality

编号 Number	因素 Factor	因素水平 Factor level		
		1	2	3
A	弯曲角度 Bending angle /($^{\circ}$)	90	120	150
B	弯曲半径 Bending radius /mm	900	1 200	1 500
C	管道进出口长度比 Pipe inlet and outlet length ratio	1:1	1:1.5	1.5:1

表7 弯管送丝的正交试验结果及极差分析

Table 7 Orthogonal experimental results and range analysis of tobacco shred conveying through bent pipes

试验组 Experimental group	因素 A/($^{\circ}$) Factor A	因素 B/mm Factor B	因素 C Factor C	误差 Error	Y(Bond 键断裂占比)/% Y(Bond key fracture ratio)
1	90	900	1:1	1	4.054
2	90	1 200	1:1.5	2	3.574
3	90	1 500	1.5:1	3	4.186
4	120	900	1:1.5	3	2.544
5	120	1 200	1.5:1	1	5.192
6	120	1 500	1:1	2	2.622
7	150	900	1.5:1	2	3.975
8	150	1 200	1:1	3	3.731
9	150	1 500	1:1.5	1	1.505
K1	3.938	3.453	3.070	3.584	
K2	3.524	4.166	2.771	3.390	
K3	3.469	2.541	4.451	3.487	
极差 Range R	0.868	1.395	1.910	0.194	
因素主次 Priority of factors		因素 C > 因素 B > 因素 A Factor C > Factor B > Factor A			
优水平 High level	A3	B3	C2		
最优组合 Optimal combination		A3B3C2			

由表7可知,极差比较可得3个弯管结构因素的主次关系依次为管道进出口长度比C、弯曲半径B和弯曲角度A。因素A3、B3、C2在三水平下的烟丝破碎程度较少,送丝效果最好,分别为弯曲角度A、弯曲半径B和进出口长度比C的优水平,即一定研究范围内,烟丝气力输送弯管的最优输送结构为弯曲角度为 150° 、弯曲半径为1 500 mm、进出口长度比为1:1.5的弯管,此时烟丝颗粒仿真破碎量为1.505%。

以仿真结果最优组合进行管道定制并进行3次同条件下的烟丝风力输送测试,取输送后的烟丝样品至烟厂烟丝结构检测仪进行检验,得到实际破碎量分别为1.34%、1.29%和1.37%,则最优组合的烟丝实际平均破碎量约为1.333%,误差值 $<0.5\%$ 。对烟厂原定制弯管连接一定长度的直弯管组合即弯曲角度为 90° 、弯曲半径为1 200 mm、进出口长度比为1:1的管道进行3次烟丝风力输送测试,得到实际破碎量为4.43%、4.40%和4.39%,则实际平均破碎量约为4.407%,仿真得到的工况1破碎量为4.601%,误差值 $<0.5\%$,验证了仿真模型的准确性与可行性。最优组合的烟丝实际比原参数破碎量减少3.074%,有效降低烟丝破碎情况。对正交试验的结果进行方差分析,由表8可知,A、B和C的P值皆小于0.05,影响因素显著。

表8 弯管输送正交试验的方差分析

Table 8 Analysis of variance for orthogonal experiment in bent pipe conveying

来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Freedom	均方 Mean square	F	P	显著性 Significance
A	1.135	2	0.567	20.268	0.048	*
B	2.925	2	1.463	52.232	0.019	*
C	5.474	2	2.737	97.750	0.010	*
误差 Error	0.056	2	0.028			
总和 Sum	9.590	8				

注:*表示在0.05水平,相关性显著。

Note:* indicates significant correlation at the 0.05 level.

2.4 仿真试验验证

为检验 CFD-DEM 模型的可靠性,本研究搭建了基于高速摄像的试验系统用于比对验证,在天津卷烟厂气力输送系统的输送弯管处的试验平台如图 10。所使用的高速摄像机为 1 s 拍摄 1 万帧,设置 3 s 的自动拍摄,以工况 1 为例,截取通过弯管时烟丝颗粒群运动状态如图 11a,与仿真过程中颗粒的运动状态如图 11b 进行对比。初步判断 CFD-DEM 模型中烟丝颗粒受风力作用输送通过弯管时运动状态与现实气力输送系统情况相吻合。在 $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速下对烟厂输送管道末端输送后的烟丝进行取样,经检测破碎量为 18.8%,模拟保留关键部位的烟丝长管道进行 10 g 烟丝的输送仿真,得到的仿真破碎量为 19.1%,误差值 $<0.5\%$,建立的 X-Y-Z 3 方向的破碎模型仿真合理。



图10 高速摄像机试验平台

Figure 10 High-speed camera test platform

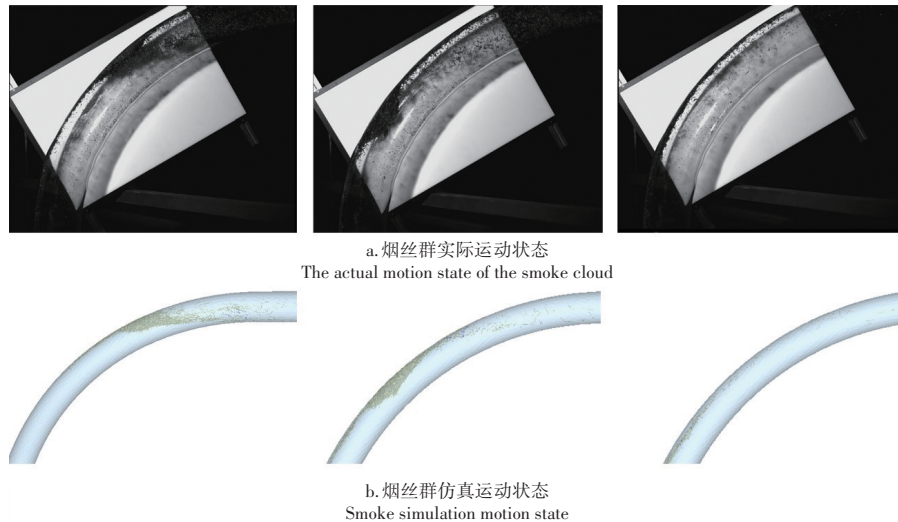


图11 不同时刻下颗粒运动状态对比

Figure 11 Comparison of particle motion states at different moments

2.4.1 基于高速摄像机的颗粒轨迹对比 使用高速摄像机专用的分析软件(Revealer Motion Analysis)以工况1为例,追踪单个烟丝颗粒,通过截取的视频帧数播放可得到颗粒的运动轨迹如图12a,在EDEM后处理中选中单个颗粒编号,通过仿真0~0.36 s播放得到颗粒运动轨迹如图12b,可以观察到烟丝与管道的碰撞多发生在管道的



图12 颗粒运动路径对比

Figure 12 Comparison of particle trajectories

外侧,管道外侧的磨损通常远大于内侧,且试验与仿真颗粒运动轨迹相近。

2.4.2 基于高速摄像机的烟丝颗粒速度变化对比 烟丝在管道内的运动平均速度同时存在加速和减速情况,这是由于水平直管内烟丝在气体的推动作用下加速,烟丝颗粒间及其与管壁的碰撞导致速度降低。以工况1为例,截取0.1~0.25 s下仿真后处理得到的烟丝颗粒平均速度,与高速摄像机拍摄得到的视频中,追踪3组单个颗粒得到的颗粒速度(选样1,2,3)进行对比如图13,可以得到在气固耦合仿真出的颗粒速度在11~12.3 m·s⁻¹间变化,处于合理烟丝速度范围内^[23],进一步验证仿真的准确性。

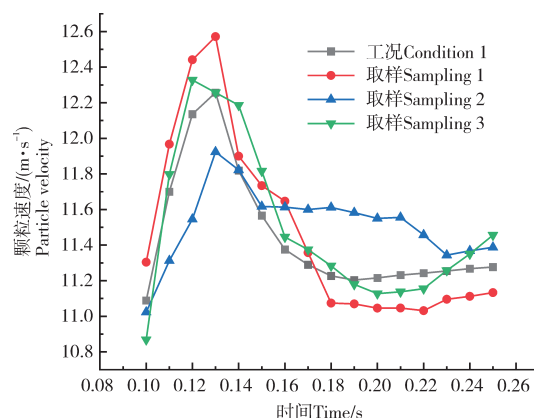


图13 烟丝颗粒速度对比

Figure 13 Comparison of tobacco particle velocity

3 讨论与结论

烟丝的相关模拟研究中,为提高仿真效率往往采用简单的柱形或扁平片状的颗粒进行烟丝的模拟,降低了仿真的准确性。在实际的生产过程中,人们往往并不了解烟丝在风力输送管道中的运动状态和弯管对烟丝输送的破碎情况的影响。本研究以X-Y-Z 3方向建立更加复杂化的烟丝模型,利用离散元模型、bond黏结模型、Archard磨损模型以弯曲角度、弯曲半径及进出口长度比例等作为参考因素,探究管道结构的优化。

以不同长度的比重构建颗粒群在管道中进行风力输送的仿真试验与试验验证可得,磨损深度较大区域主要集中在弯管部位,且最大磨损量随弯曲角度增大呈降低趋势。在弯曲角度为90°~150°的范围内,随着角度增大,管道总磨损量降低,烟丝颗粒剩余Bond键占比增大;在弯曲半径为900~1500 mm区间内,随着半径增大,总磨损量减小,剩余Bond键占比先下降后上升;管道进出口长度比1:1.5时的烟丝气力输送系统的管道磨损程度小于进出口长度1:1和1.5:1时,剩余Bond键占比大于1:1和1.5:1工况。一定范围内,最优管道结构为弯曲角度为150°、弯曲半径为1500 mm、进出口长度比为1:1.5的直弯管组合,此时仿真10 g烟丝颗粒群断裂Bond键占比为1.505%,实际试验所得烟丝破碎量为1.333%,误差值<0.5%。比实际一般工况的烟丝破碎量减少约3.074%,烟丝的破碎程度能够有效减少,进一步降低卷烟生产成本。

参考文献:

- [1] 凌 啸. 烟丝气力输送系统流动特性分析[D]. 衡阳:南华大学,2011.
LING X. Analysis on the flow property of pneumatic conveying system of cut tobacco[D]. Hengyang: University of South China, 2011.
- [2] 姚光明,王文辉,尹献忠,等. 烟丝结构对烟丝填充值和卷接质量的影响[J]. 郑州轻工业学院学报(自然科学版),2003,18(4):62-64.
YAO G M, WANG W H, YIN X Z, et al. Effect of the size proportion of cut tobacco on the filling power of cut tobacco and cigarette making quality[J]. Journal of Zhengzhou Institute of Light Industry(Natural Science), 2003, 18(4): 62-64.
- [3] 张皓天. 梗签二次分离装置内气固两相流的数值模拟研究及结构设计[D]. 昆明:昆明理工大学,2019.
ZHANG H T. Numerical simulation and structural design of gas-solid two-phase flow in the secondary separation device of stem stalk[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019.
- [4] 王 怀,樊瑜瑾,刘小川,等. 基于CFD-DEM耦合的浮选腔挡风块形状设计优化[J]. 农业装备与车辆工程,2022,60(5):102-106.
WANG H, FAN Y J, LIU X C, et al. Shape design optimization of wind block in flotation chamber based on CFD-DEM coupling[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2022, 60(5): 102-106.
- [5] 黄朵朵. 基于CFD-DEM方法的烟丝颗粒工业气力输送过程两相传递特性研究[D]. 郑州:中国烟草总公司郑州烟草研究院, 2025.
HUANG D D. Study on two-phase transfer characteristics of tobacco particles in industrial pneumatic conveying process based on CFD-DEM method[D]. Zhengzhou: Zhengzhou Tobacco Research Institute of CNTC, 2025.
- [6] OSCHMANN T, HOLD J, KRUGGEL-EMDEN H. Numerical investigation of mixing and orientation of non-spherical particles in a model type fluidized bed[J]. Powder Technology, 2014, 258: 304-323.
- [7] 李 光,徐笙凯. 风室环境下基于烟丝运动特征的烟丝模型结构优化[J]. 沈阳农业大学学报,2025,56(4):83-92.

- LI G,XU S K.Structural optimization of cut tobacco model based on movement characteristics of tobacco in wind chamber[J].Journal of Shenyang Agricultural University,2025,56(4):83-92.
- [8] 苏鹏宇,令狐延,郑坤隆,等.基于离散元耦合的气力输送管道壁面磨损分析[J].天津建设科技,2025,35(1):38-42.
SU P Y,LINGHU Y,ZHENG K L,et al.Analysis on wear of pneumatic conveying pipeline based on CFD-DEM method[J].Tianjin Construction Science and Technology,2025,35(1):38-42.
- [9] 许云龙,令狐延,郑坤隆,等.真空垃圾储运管道弯头冲蚀与优化研究[J].天津建设科技,2025,35(3):47-52.
XU Y L,LINGHU Y,ZHENG K L,et al.Research on erosion and optimization of elbows in vacuum waste storage and transportation pipelines[J].Tianjin Construction Science and Technology,2025,35(3):47-52.
- [10] 李全胜,纪晓楠,王浩宇,等.卷烟制丝过程烟草物料二维形态特征分析[J].轻工科技,2024,40(3):165-170.
LI Q S,JI X N,WANG H Y,et al.Analysis of two-dimensional morphological characteristics of tobacco materials in cigarette shredding process[J].Light Industry Science and Technology,2024,40(3):165-170.
- [11] 吴嘉鑫,张学敏,徐静,等.基于气固耦合的脉冲集束式番茄授粉方法研究[J].农业机械学报,2024,55(S1):306-316.
WU J X,ZHANG X M,XU J,et al.Pulse cluster tomato pollination method based on gas-solid coupling[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(S1):306-316.
- [12] ZAREKAR S,BÜCK A,JACOB M,et al.Numerical study of the hydrodynamics of fluidized beds operated under sub-atmospheric pressure[J].Chemical Engineering Journal,2019,372:1134-1153.
- [13] AHUJA G N,PATWARDHAN A W. CFD and experimental studies of solids hold-up distribution and circulation patterns in gas-solid fluidized beds[J].Chemical Engineering Journal,2008,143(1/2/3):147-160.
- [14] 耿仁杰,胡国玉,买买提明·艾尼,等.长绒棉气力采摘输送系统摘棉室结构设计与仿真分析[J].农机化研究,2025,47(11):38-45.
GENG R J,HU G Y,MAMTIMIN G N,et al.Design and simulation analysis of the cotton picking chamber structure for the pneumatic picking and conveying system of sea island cotton[J].Journal of Agricultural Mechanization Research,2025,47(11):38-45.
- [15] JAMALEDDINE T J,RAY M B. Application of computational fluid dynamics for simulation of drying processes:A review[J].Drying Technology,2010,28(2):120-154.
- [16] ZHAO Y H,LU B,ZHONG Y J. Influence of collisional parameters for rough particles on simulation of a gas-fluidized bed using a two-fluid model[J].International Journal of Multiphase Flow,2015,71:1-13.
- [17] 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 Y F.Discrete element modelling of the wheat particles and short straw in cleaning devices[D].Yangling:Northwest A & F University,2018.
- [18] 樊新波,王桂红,罗杨,等.基于CFD-DEM耦合的混凝土输送弯管冲蚀磨损数值模拟[J].南方农机,2025,56(增刊1):125-128.
FAN X B,WANG G H,LUO Y,et al.Numerical simulation of erosion wear of concrete conveying elbow based on CFD-DEM coupling[J].China Southern Agricultural Machinery,2025,56(S1):125-128.
- [19] 李紫迪.基于CFD-DEM气固耦合的烟丝气力输送系统数值模拟研究[D].天津:天津科技大学,2024.
LI Z D.Numerical simulation of cut tobacco pneumatic conveying system based on CFD-DEM gas-solid coupling[D].Tianjin:Tianjin University of Science & Technology,2024.
- [20] 张宏友,张程,钟铭深,等.甘蔗茎秆离散元仿真粘结模型参数标定[J].中国农业科技导报(中英文),2025,27(10):105-117.
ZHANG H Y,ZHANG C,ZHONG M S,et al.Parameter calibration of sugarcane stalk bonding model based on discrete element method[J].Journal of Agricultural Science and Technology,2025,27(10):105-117.
- [21] 李光,李紫迪.烟丝离散元接触参数标定及其破碎模型构建[J].沈阳农业大学学报,2025,56(1):59-72.
LI G,LI Z D. Calibration of discrete elemental contact parameters of tobacco and its breakage model construction[J].Journal of Shenyang Agricultural University,2025,56(1):59-72.
- [22] 宋海豪,徐雪萌,尚坤,等.基于CFD-DEM耦合模型的弯管起旋装置优化及减磨效果研究[J].包装工程,2025,46(13):186-196.
SONG H H,XU X M,SHANG K,et al.Optimization of the bending pipe swirling device and the wear reduction effect based on the CFD-DEM coupling model[J].Packaging Engineering,2025,46(13):186-196.
- [23] 高现磊,戴石良,谢海,等.基于HSMA图像分析烟丝速度对烟丝流态的影响[J].上海节能,2024(9):1510-1519.
GAO X L,DAI S L,XIE H,et al.Analysis of the influence of tobacco velocity on tobacco flow state based on HSMA image[J].Shanghai Energy Conservation,2024(9):1510-1519.