

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.

烟丝离散元接触参数标定及其破碎模型构建

李光, 李紫迪

(天津科技大学轻工科学与工程学院, 天津 300457)

摘要: [目的]针对目前烟丝颗粒仿真中离散元接触参数缺乏、破碎模型空缺的问题,进行烟丝接触参数标定,构建烟丝破碎模型,并进行破碎参数标定。[方法]以烟丝为研究对象,构建烟丝离散元接触模型,结合 Plackett-Burman 试验设计和 Box-Behnken 试验设计确定烟丝各项物理参数,其中烟丝颗粒泊松比、烟丝间恢复系数、烟丝间静摩擦系数、烟丝间滚动摩擦系数、烟丝与设备恢复系数、烟丝与设备静摩擦系数、烟丝与设备动摩擦系数及烟丝剪切模量的最优值分别为 0.35, 0.35, 0.49, 0.03, 0.35, 0.44, 0.12, 5.75×10^6 Pa; 构建烟丝破碎模型,通过重球跌落试验标定破碎模型的主要参数,其中黏结半径 0.216 mm、单位法向刚度 4.62×10^{10} N·m⁻³、单位切向刚度 1.62×10^{10} N·m⁻³、临界法向力 5.10×10^{10} Pa、临界切向力 1.89×10^{10} Pa,并通过单轴压缩试验进一步验证破碎参数的有效性。[结果]在烟丝离散元接触参数标定中,数值模拟与试验结果相对误差平均值为 2.9%,烟丝离散元接触参数标定精确;在烟丝破碎模型的参数标定中,重球跌落的数值模拟与试验结果相对误差平均值为 0.82%,单轴压缩的数值模拟与试验结果相对误差平均值为 4.53%,烟丝破碎模型可靠。[结论]研究结果可为探究烟丝造碎提供有效模型参考。

关键词: 烟丝; 离散元; 虚拟标定; 破碎模型; 数值模拟

中图分类号: TS43

文献标识码: A

文章编号: 1000-1700(2025)01-0059-14

Calibration of Discrete Elemental Contact Parameters of Tobacco and Its Breakage Model Construction

LI Guang, LI Zidi

(College of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: [Objective] In view of the lack of discrete element contact parameters and breakage model of tobacco in the particle simulation, the contact parameters of tobacco were calibrated, the breakage model of tobacco was constructed, and the breakage parameters were calibrated. [Methods] A discrete element contact model was constructed taking tobacco as the research object. Plackett-Burman test design and Box-Behnken test design were combined to determine the physical parameters of tobacco. The optimal values of Poisson's ratio of tobacco, coefficient of recovery between tobacco, coefficient of static friction between tobacco, coefficient of rolling friction between tobacco, coefficient of recovery between tobacco and equipment, coefficient of static friction between tobacco and equipment, coefficient of kinetic friction between tobacco and equipment and the shear modulus of the tobacco were 0.35, 0.35, 0.49, 0.03, 0.35, 0.44, 0.12, 5.75×10^6 Pa respectively. The breakage model of tobacco was constructed, and the main parameters were calibrated using heavy ball drop experiments, including a bond radius of 0.216 mm, a unit normal stiffness of 4.62×10^{10} N·m⁻³, a unit tangential stiffness of 1.62×10^{10} N·m⁻³, a critical normal force of 5.10×10^{10} Pa and critical tangential force 1.89×10^{10} Pa. The validity of the breakage parameters was further verified using uniaxial compression test. [Results] In the calibration of discrete element contact parameters of tobacco, the average relative error between numerical simulation and test results was 2.9%, and the calibration results of

收稿日期: 2024-03-11 修回日期: 2024-05-10

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

discrete element contact parameters of tobacco were accurate; in the calibration of breakage model parameters of tobacco, the average relative error between numerical simulation and test results of heavy ball drop was 0.82%, and the average relative error between numerical simulation and test results of uniaxial compression was 4.53%, and the tobacco breakage model was reliable. **[Conclusion]** The research can provide an effective model reference for the exploration of tobacco breakage.

Key words: tobacco; discrete element; virtual calibration; breakage model; numerical simulation

为了保障卷烟生产作业中的整洁,气力输送被广泛应用并作为主要的运输手段。然而在气力输送中,烟丝运动容易受到多种流体作用力的影响,容易出现烟丝造碎增加、烟丝结块、管口堵塞等问题,进而影响成品卷烟质量和生产成本。

多相流数值模拟常采用离散元法(Discrete Element Method, DEM)描述颗粒的流动状态,而离散元参数标定试验正是提高 DEM 模型可靠性的关键。离散元标定研究多聚焦于农作物种子^[1-5]、农业生产的土壤问题^[6-7]、煤炭矿物的研究^[8-10],研究对象具有硬质、类球状、长径比小的特点。然而,对于烟丝等长径比大且脆性的颗粒尚无研究报道。因此,开展烟丝的离散元参数标定试验有助于提高数值模拟研究的可靠性。

除 Hertz-Mindlin 离散元接触模型外,DEM 还提供了可用于研究物料破碎的 Bonding 模型。Bonding 模型的关键在于物料力学参数的标定研究。刘禹辰等^[11]通过力学试验和离散元法仿真,将黏结键断裂情况作为评定指标,研究了玉米秸秆受外力时的破裂程度;廖宜涛等^[12]对饲料油菜茎秆进行了弯曲破坏仿真试验,并通过响应面分析确定了模型的主要参数;张兆国等^[13]建立了三七根茎的黏结模型,模拟了其内部结构与损伤情况;张喜瑞等^[14]使用离散元仿真建立香蕉秸秆的黏结模型,为其粉碎过程中纤维断裂特性研究提供依据。烟丝破碎的研究集中在物理试验中,缺乏烟丝破碎的数值模型。因此,建立烟丝破碎模型并进行破碎参数的标定有助于烟丝造碎的深入研究,从而为优化卷烟工艺提供理论指导。

本研究基于离散元方法构建烟丝离散元模型及其破碎模型。对烟丝本征参数和微观接触参数进行物理测定及试验标定,基于尺度不变特征转换(SIFT)算法构建烟丝的 Hertz-Mindlin 离散元接触模型,以堆积角为响应值完成接触参数的标定;基于 Bonding 黏结理论,建立烟丝柔性破碎模型,并通过重球跌落、单轴压缩等力学试验进行破碎参数的标定,为烟丝造碎研究提供可靠的破碎模型。

1 材料与方 法

1.1 材料、试剂和仪器

烟丝:取自天津卷烟厂喂丝机生产线,进行温度(24±2)℃、相对湿度(60±2)%的恒温恒湿处理,处理时间 48 h。
试剂:正己烷(上海麦克林生化科技股份有限公司)。

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)、电热恒温鼓风干燥箱(DHG-9240A,天津科诺仪器)、恒温恒湿箱(ETH-408-40-CP-AR,北京巨贸仪器)、落球冲击试验机(DR-7017,东日仪器)、万能试验机(3369 型电子万能试验机,美国 instron 公司)、堆积角测量装置。

1.2 烟丝本征参数测定

依据《YC/T 1473-2013 烟丝表观密度、真密度和内孔容积的测定》《YC/T 178-2003 烟丝整丝率、碎丝率的测定方法》《YC/T31-1996 烟草及烟草制品试样的制备和水分测定烘箱法》行业标准测得烟丝样品的密度为 1 281 kg·m⁻³,整丝率为 80.55%、碎丝率为 1.48%,含水率为 12.8%^[15-17]。为表征不同烟丝颗粒的运动形态,采用孔径尺寸为 3, 2.5, 1 mm 的筛网进行烟丝筛分。

取 0.05 kg 烟丝样品进行筛分试验,根据烟丝整丝率、碎丝率标准将筛后的烟丝分为 3 类:一级筛选物(>2.5 mm)、二级筛选物(2.5~1 mm)、三级筛选物(<1 mm)。一级筛分物、二级筛分物、三级筛分物的质量占比分别为 81.56%、16.94% 和 1.5%。使用精度 0.01 mm 的数显游标卡尺随机选取筛后的各层级烟丝进行尺度测定,结果如图 1。

1.3 烟丝接触参数标定(Hertz-Mindlin)

1.3.1 烟丝离散元模型的建立 基于尺度不变特征转换(SIFT)算法^[18-19]对筛分后各层级烟丝进行轮廓相似度检测。在筛分物料中采集 3 组烟丝图像,利用 python 语言创建 SIFT 图像匹配项目,对图集内的每张图像进行遍历计算,相似度统计结果如图 2。

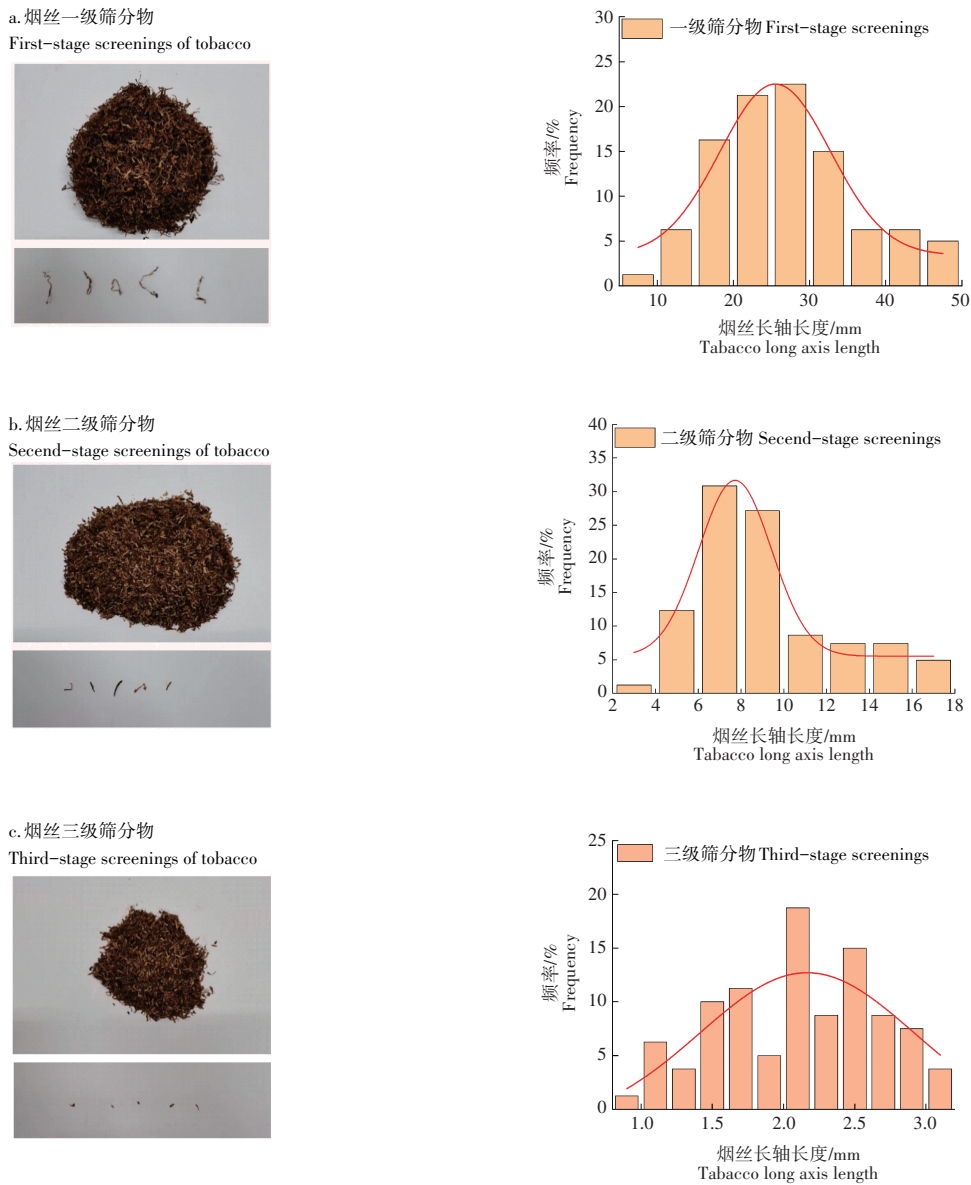


图1 各级烟丝筛分物(左)及其长轴长度分布(右)

Figure 1 All levels of tobacco screenings (left) and its long axis length distribution (right)

烟丝图像在图集内的相似度越高,表明该烟丝图像相较于其他图像更具有代表性。图2结果显示一级筛分物、二级筛分物的相似度统计结果较为分散,形态差异大。三级筛分物的尺寸较小,相似度集中在90%。

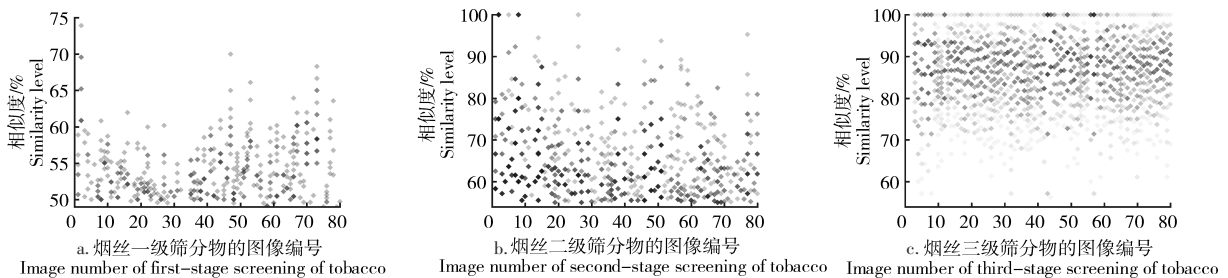


图2 基于SIFT的相似度统计结果

Figure 2 Statistical results of similarity based on SIFT

烟丝形态各异,在一级筛分物、二级筛分物、三级筛分物中分别选取出相似度较高的2,2,1个烟丝形态。5种烟丝的图像如图3,其编号分别记为1-1,1-2,2-1,2-2,3-1。

依据图3中5种烟丝尺寸构建对应的Hertz-Mindlin离散元模型(图4)。在后续的仿真试验中,分别以40.78%、40.78%、8.47%、8.47%和1.5%的比例进行5种烟丝颗粒的构建。

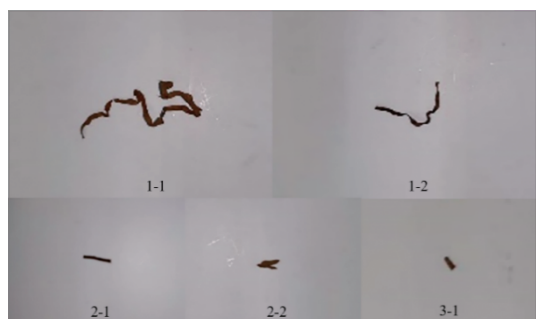


图3 SIFT匹配后的5种烟丝真实形状

Figure 3 The true shape of five kinds of tobacco after SIFT matching

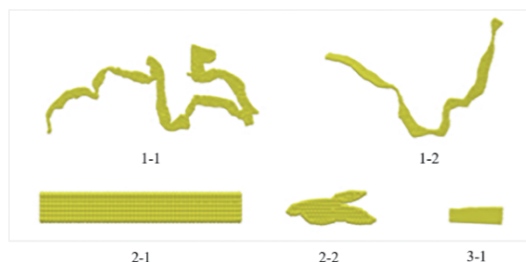


图4 烟丝的Hertz-Mindlin离散元模型

Figure 4 Hertz-Mindlin discrete element models of Tobacco

1.3.2 烟丝堆积角物理试验 采用堆积角试验进行烟丝离散元触参数的标定^[20-24],共进行10组,每组取样0.05 kg。

1.3.3 烟丝离散元接触参数标定 依据烟丝筛分情况生成0.05 kg的烟丝颗粒,一级筛分物、二级筛分物、三级筛分物的总质量占比分别为0.040 78,0.008 47,0.000 75 kg。待颗粒静息后去除挡板进行堆积角标定。卷烟车间现有的送丝设备以铝材为主,故采用铝板进行烟丝接触参数的标定试验。此外,烟丝泊松比、弹性模量等试验参数难以通过设备测量,仿真接触参数的初始取值范围参考相似物料的相关研究^[25-31]。通过Plackett-Burman试验确定接触参数与响应值的显著水平^[32],试验参数如表1。

表1 Plackett-Burman试验参数

Table 1 Plackett-Burman test parameters

符号 Symbol	参数 Parameter	低水平 Low level	高水平 High level
A	烟丝颗粒泊松比 Poisson's ratio of tobacco particles	0.30	0.40
B	烟丝颗粒-烟丝颗粒恢复系数 Tobacco particle tobacco particle recovery coefficient	0.20	0.50
C	烟丝颗粒-烟丝颗粒静摩擦系数 Static friction coefficient between tobacco particles and tobacco particles	0.30	1.00
D	烟丝颗粒-烟丝颗粒滚动摩擦系数 Rolling friction coefficient between tobacco particles and tobacco particles	0.03	0.10
E	烟丝颗粒-铝板恢复系数 Recovery coefficient of tobacco granule-aluminum plate	0.20	0.50
F	烟丝颗粒-铝板静摩擦系数 Static friction coefficient between tobacco particles and aluminum plate	0.30	0.58
G	烟丝颗粒-铝板动摩擦系数 Dynamic friction coefficient between tobacco particles and aluminum plate	0.01	0.15
H	剪切模量 Shear modulus/($\times 10^6$ Pa)	1.50	10.00
I	虚拟参数1 Virtual parameter 1	-1	1
J	虚拟参数2 Virtual parameter 2	-1	1
K	虚拟参数3 Virtual parameter 3	-1	1

1.4 烟丝破碎模型的建立及标定

1.4.1 烟丝破碎模型理论 烟丝破碎模型通过Bond黏结键连接单元球体,当单元球体所受外力大于Bond键的临界应力时黏结键断裂,颗粒发生破碎。Bond模型的破碎性能取决于5个关键参数:黏结半径 R_b 、单位法向强度

S_n 、单位切向强度 S_t 、临界法向应力 σ_{max} 、临界切向应力 τ_{max} 。单位法向刚度通过下式计算^[33]:

$$S_n = \frac{E}{2R_b} \quad (1)$$

$$S_t = \nu S_n \quad (2)$$

式中: ν 为泊松比; E 为弹性模量。临界法向应力、临界切向应力的初始取值通过物理性能试验测定。其中,临界法向应力与切向应力比值系数取0.37^[34]。

1.4.2 烟丝破碎模型的建立 烟丝造碎易发生于一级筛分物料中,依据均值尺寸建立破碎模型(图5)。该模型具有弯曲特征,可表征烟丝颗粒的一般特性,单元球体半径为0.15 mm。

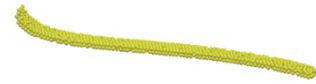


图5 烟丝破碎模型

Figure 5 Tobacco broken model

1.4.3 重球跌落物理试验 破碎参数的标定试验主要为剪切、三点弯曲和巴西盘试验等,要求待测物料存在一定刚度及可夹持性,在预试验中发现烟丝试样难以满足上述试验要求,最终采用磁吸落球冲击试验机进行破碎参数的标定。以单个烟丝在跌落冲击点处的破碎状态为标定指标,取烟丝破碎的平均跌落高度作为其极限跌落高度。

1.4.4 烟丝破碎参数标定 烟丝破碎模型的基础接触参数参照堆积角标定结果,其他材料的接触参数设置如表2。根据物理试验结果计算破碎参数的初始取值^[33],对黏结半径、单位法向刚度、临界法向力进行单因素分析。以跌落高度为响应值进行响应面分析,获得烟丝破碎参数的最优解。

1.4.5 破碎模型的单轴压缩验证 通过单轴压缩试验对组合参数进行验证。烟丝的堆积高度40 mm,质量0.08 kg。设定预加载载荷1 N,预加载压头速度80 mm·min⁻¹。压缩时压头速度60 mm·min⁻¹,设定最大载荷位移35 mm,进行3次平行试验,记录载荷位移变化。

表2 重球跌落试验的仿真参数

Table 2 Simulation parameters for heavy ball drop experiments

试验装置 Experimental setup	参数指标 Parameter indicator	参数水平 Parameter level
钢球 Steel ball	材料 Materials	轴承钢 Bearing steel
	密度 Density/(g·cm ⁻³)	7.8
	半径 Radius/mm	12.50
	质量 Mass/kg	0.065
	弹性模量 Elastic modulus/GPa	208
	泊松比 Poisson's ratio	0.30
冲击板 Impact plate	材料 Materials	低碳钢 Mild steel
	密度 Density/(g·cm ⁻³)	7.9
	尺寸 Size/(mm×mm)	450×450
	弹性模量 Elastic modulus/GPa	206
	泊松比 Poisson's ratio	0.28
钢球-冲击板 Steel ball-impact plate	静摩擦系数 Static friction coefficient	0.30
	滚动摩擦系数 Coefficient of rolling friction	0.01
	恢复系数 Recovery coefficient	0.56
冲击板-烟丝 Impact plate-tobacco	静摩擦系数 Static friction coefficient	0.44
	滚动摩擦系数 Coefficient of rolling friction	0.15
	恢复系数 Recovery coefficient	0.35

2 结果与分析

2.1 烟丝接触参数标定

2.1.1 堆积角图像处理 采用Matlab对堆积图像轮廓进行线性拟合处理(图6)。以10组试验的平均值作为最

终的堆积角取值。堆积角 θ 为 28.94° 。

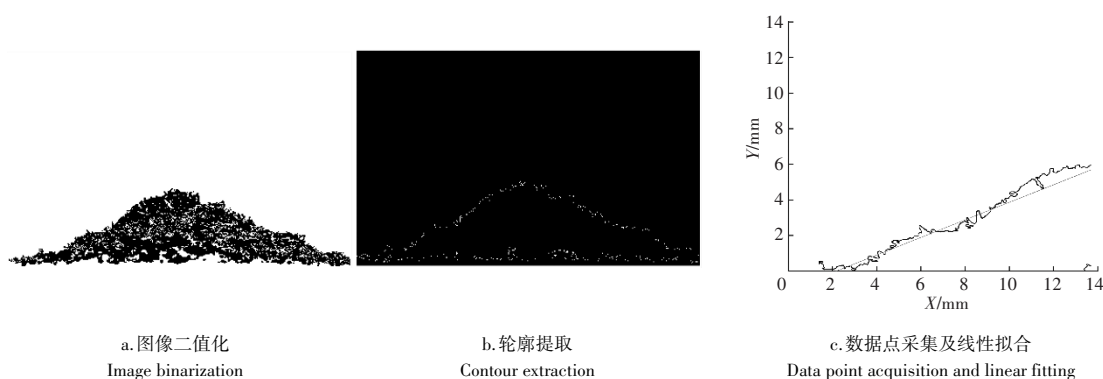


图6 堆积角图像处理

Figure 6 Repose angle image processing

2.1.2 烟丝离散元接触参数标定

2.1.2.1 Plackett-Burman 试验设计 结合Design-Expert进行堆积角仿真的Plackett-Burman试验设计, 试验方案及结果如表3, 得到各因素与响应值堆积角之间的多元一次回归方程为:

$$\theta = 39.52 - 2.14A - 0.28B + 7.87C + 3.38D - 0.48E + 0.36F - 2.92G - 0.57H \quad (3)$$

表3 Plackett-Burman试验设计及结果

Table 3 Plackett-Burman experimental design and results

序号 Number	参数 Parameters								堆积角 θ / ($^\circ$) Repose angle
	A	B	C	D	E	F	G	H	
1	0.4	0.2	1.0	0.10	0.2	0.58	0.15	1×10^7	45.30
2	0.4	0.2	0.3	0.03	0.5	0.30	0.15	1×10^7	23.41
3	0.4	0.2	1.0	0.10	0.5	0.30	0.01	1.5×10^6	51.11
4	0.3	0.2	0.3	0.10	0.2	0.58	0.15	1.5×10^6	36.91
5	0.4	0.5	0.3	0.10	0.5	0.58	0.01	1.5×10^6	36.41
6	0.3	0.2	1.0	0.03	0.5	0.58	0.01	1×10^7	48.75
7	0.4	0.5	1.0	0.03	0.2	0.30	0.15	1.5×10^6	39.45
8	0.3	0.2	0.3	0.03	0.2	0.30	0.01	1.5×10^6	33.33
9	0.3	0.5	1.0	0.03	0.5	0.58	0.15	1.5×10^6	43.32
10	0.3	0.5	0.3	0.10	0.5	0.30	0.15	1×10^7	31.24
11	0.4	0.5	0.3	0.03	0.2	0.58	0.01	1×10^7	28.62
12	0.3	0.5	1.0	0.10	0.2	0.30	0.01	1×10^7	56.43

Plackett-Burman 试验方差分析结果如表4, 模型整体的 f 值为 $45.26 > 1$, $P < 0.01$, 表明模型合理可靠。其中, C (烟丝颗粒-烟丝颗粒静摩擦系数)、 D (烟丝颗粒-烟丝颗粒滚动摩擦系数)、 G (烟丝颗粒-铝板动摩擦系数)3个影响因子 $P < 0.01$, 为极显著因子。 A (泊松比) $P < 0.05$, 为一般显著因子。 B 、 E 、 F 、 H 的 $P > 0.05$, 皆表现出不显著性。模型的 R^2 为99.18%, 调整系数 R^2_{Adj} 为96.99%, 变异系数为4.30%, 表明方程拟合度较好。

2.1.2.2 最陡爬坡试验设计 选取堆积角影响前三的因素进行最陡爬坡试验设计。依据各参数取值范围设定爬坡步长, 其余参数取值选取中心水平^[35]。最陡爬坡试验方案及结果如表5, 随着烟丝颗粒-烟丝颗粒静摩擦系数、烟丝颗粒-烟丝颗粒滚动摩擦系数等取值的不断增加, 烟丝颗粒-铝板动摩擦系数取值的不断下降, 堆积角呈逐步增大。其中, 第2组的试验结果与物理堆积角的相对误差最小。

2.1.2.3 Box-Behnken 试验设计 选取表5中的第2组试验参数作为响应面中心水平(0), 1组和3组作为(-1)、(+1)参数水平进行Box-Behnken响应面试验设计, 试验方案如表6, 按照每组试验方案分别进行堆积角数值模拟, 得到了15组试验对应的堆积角结果。

通过Design-Expert软件对表6中的Box-Behnken试验结果进行多元回归拟合并优化, 方差分析结果如表7, 得到各因素与响应值堆积角 θ 优化后的二阶回归方程为:

表4 Plackett-Burman试验方差分析结果

Table 4 Results of the analysis of variance for the Plackett-Burman test

来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 df	均方 Mean square	f	P	显著性 Significance
模型 Model	1 046.35	8	130.79	45.26	0.004 8	**
A	54.96	1	54.96	19.02	0.022 3	*
B	0.93	1	0.93	0.32	0.610 3	
C	743.24	1	743.24	257.20	0.000 5	**
D	136.82	1	136.82	47.35	0.006 3	**
E	2.80	1	2.80	0.97	0.397 3	
F	1.57	1	1.57	0.54	0.514 5	
G	102.20	1	102.20	35.37	0.009 5	**
H	3.83	1	3.83	1.33	0.333 0	
误差 Error	8.67	3	2.89			
总和 Total	1 055.02	11				
$R^2=99.18\%$	$R_{Adj}^2=96.99\%$					

注: *表示差异性显著($P<0.05$), **表示差异性极显著($P<0.01$)。

Note: *indicates significant difference ($P<0.05$), **indicates extremely significant difference ($P<0.01$).

表5 最陡爬坡试验方案设计及分析

Table 5 The steepest climbing experimental design and analysis

试验 Test	烟丝颗粒-烟丝颗粒 静摩擦系数 Coefficient of static friction of tobacco-tobacco	烟丝颗粒-烟丝颗粒 滚动摩擦系数 Coefficient of rolling friction of tobacco-tobacco	烟丝颗粒-铝板 动摩擦系数 Coefficient of kinetic friction of tobacco-aluminum plate	堆积角 $\theta/(^\circ)$ Repose angle
1	0.3	0.030	0.15	18.27
2	0.5	0.045	0.10	32.17
3	0.7	0.060	0.05	43.57
4	0.9	0.075	0.00	48.58

表6 Box-Behnken试验方案及结果

Table 6 The Box-Behnken experimental plan and result

试验 Test	烟丝颗粒-烟丝颗粒 静摩擦系数 Coefficient of static friction of tobacco-tobacco	烟丝颗粒-烟丝颗粒 滚动摩擦系数 Coefficient of rolling friction of tobacco-tobacco	烟丝颗粒-铝板 动摩擦系数 Coefficient of kinetic friction of tobacco-aluminum plate	堆积角 $\theta/(^\circ)$ Repose angle
1	-1	0	1	17.28
2	0	1	-1	42.05
3	0	1	1	45.90
4	0	-1	-1	44.45
5	0	0	0	28.33
6	0	-1	1	28.24
7	-1	0	-1	19.75
8	1	0	1	41.08
9	1	0	-1	41.35
10	-1	-1	0	18.12
11	1	1	0	44.72
12	-1	1	0	21.90
13	1	-1	0	41.81
14	0	0	0	30.77
15	0	0	0	29.94

$$\theta=29.68-1.89G+11.49C+2.74D+5.02GD+4.35C^2-4.17C^2+6.13D^2 \quad (4)$$

优化后二次回归模型整体的 $P<0.000 1$, 决定系数 R^2 为 98.37%, 调整系数 R_{Adj}^2 为 96.74%, 表明模型不失拟、

拟合度较好。

表7 Box-Behnken试验优化后的回归模型方差分析

Table 7 The analysis of variance of optimized regression model of Box-Behnken test

来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 df	均方和 Mean square	<i>f</i>	<i>P</i>
模型 Model	1 530.095	7	218.585	60.287 19	< 0.000 1
<i>G</i>	28.501 25	1	28.501 25	7.860 834	0.026 4
<i>C</i>	1 055.931	1	1 055.931	291.232 8	< 0.000 1
<i>D</i>	60.225 31	1	60.225 31	16.610 54	0.004 7
<i>GD</i>	100.600 9	1	100.600 9	27.746 4	0.001 2
<i>G</i> ²	69.988 21	1	69.988 21	19.303 21	0.003 2
<i>C</i> ²	64.166 68	1	64.166 68	17.697 6	0.004 0
<i>D</i> ²	138.575 8	1	138.575 8	38.220 12	0.000 5
残差 Residual	25.380 1	7	3.625 729		
失拟项 Lack of fit	22.301 9	5	4.460 38	2.898 044	0.276 2
纯误差 Pure error	3.078 2	2	1.539 1		
总和 Sum	1 555.475	14			
<i>R</i> ² =98.37%	<i>R</i> _{Adj} ² =96.74%				

根据上述二阶回归方程,以 $\theta=28.94^\circ$ 为响应值进行求解,解得烟丝颗粒-烟丝颗粒静摩擦系数(*C*)、烟丝-烟丝颗粒滚动摩擦系数(*D*)、烟丝颗粒-铝板动摩擦系数(*G*)的最优解分别为0.49,0.03,0.12。

对最优解参数进行堆积角模拟验证,3次验证仿真试验所测堆积角分别为 29.02° 、 27.69° 、 30.12° ,相对误差2.9%,解得的最优离散元接触参数可用于烟丝的仿真研究。

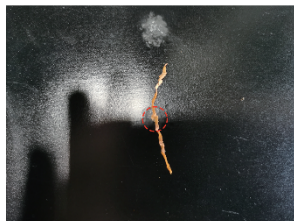
2.2 烟丝破碎参数标定

2.2.1 计算破碎参数初始取值 通过烟丝破碎的极限跌落高度计算破碎参数的初始取值。为快速确定烟丝极限跌落高度,以50 mm高度为一组进行物理跌落预试验,确定破碎高度所在范围,试验结果如表8。跌落高度小于50 mm时,烟丝基本不发生断裂。当跌落高度大于50 mm时,部分试验组开始出现轻微破损,烟丝纤维向接触面周围挤压,未完全表现出断裂现象(图7a)。当跌落高度大于150 mm时,部分烟丝出现烟丝完全断裂(图7b)。当跌落高度大于250 mm,烟丝皆呈现断裂现象。由于烟丝断裂时颗粒破碎明显,易于对比,故以烟丝跌落点完全断裂进行烟丝破碎的表征。

表8 重球跌落预试验设计及结果

Table 8 Experimental design and results of heavy ball drop pre-test

次数 Number	跌落高度 Drop height/mm							
	<50	50~100	100~150	150~200	200~250	250~300	300~350	350~400
跌落 Falls	10	10	10	10	10	10	10	10
断裂 Broken	0	2	4	6	8	10	10	10



a. 烟丝跌落点挤压未完全断裂
Tobacco squeezed but not completely broken



b. 烟丝跌落点完全断裂
Tobacco completely broken

图7 重球跌落试验中烟丝的破损形态

Figure 7 Breakage patterns of tobacco in heavy ball drop experiment

为进一步确定物理试验中烟丝破损的极限跌落高度,以起始高度 50 mm、高度增量为 1 mm 进行多次跌落试验,直至跌落高度达到 350 mm。记录每次跌落后的烟丝受损情况并统计烟丝挤压、断裂出现的试验次数,结果如表 9,烟丝破碎的极限跌落高度(球心)为 225 mm,跌落位移 212.5 mm。

表9 不同跌落高度下的重球跌落试验结果

Table 9 Results of heavy ball drop experiments with different drop heights

破碎程度 Degree of crushing	相应破碎程度出现的试验次数 The number of tests for the corresponding crushing degree	均值高度(球心)/mm Mean height (center of sphere)
烟丝挤压 Tobacco squeezed	119	214
烟丝断裂 Tobacco broken	88	225

依据烟丝破碎的极限跌落高度 225mm,计算模型破碎参数的初始取值如表 10,其中单位法向、切向刚度根据式 2 转换^[33],临界法向、切向力根据比值系数 0.37 转换^[34]。

表10 烟丝破碎模型中Bond参数的初始取值

Table 10 Initial values of Bond parameters in the tobacco broken model

符号 Symbol	参数 Parameter	初始取值 Initial value
A	黏结半径 Bond radius/mm	0.20
B	单位法向刚度 Unit normal stiffness/($\times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$)	3.88
C	单位切向刚度 Unit tangential stiffness/($\times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.36
D	临界法向力 Critical normal force/($\times 10^8 \text{ Pa}$)	9.44
E	临界切向力 Critical tangential force/($\times 10^8 \text{ Pa}$)	3.49

2.2.2 基于单因素试验的标定参数范围确定 为进一步确定Box - Behnken烟丝破碎试验的参数取值,对黏结半径、单位法向刚度、临界法向力进行单因素分析,记录破碎模型的颗粒状态。在数值模拟中,破碎参数的不匹配容易导致破碎模型生成的Bond键不稳定,从而造成烟丝破碎。(以黏结半径为例,黏结半径过大或过小,都会导致模型不稳而发生破碎,如图8)。根据表8中物理跌落的试验可知,若在大于50 mm的跌落高度进行单因素模拟,烟丝样品均出现破碎,难以辨析其破碎原因是模型不稳定,还是恰好到达极限跌落高度。因此,为排除破碎模型不稳定的干扰,以10 mm跌落高度进行单因素试验模拟。



图8 参数不匹配导致的模型破碎

Figure 8 Model fragmentation caused by parameter mismatch

不同黏结半径下模型的颗粒状态如表 11。当黏结半径小于 0.15 mm 时,颗粒无法生成,这是由于黏结键过小,无法生成稳定的 Bond 结构。当黏结半径大于 0.2 mm 后,颗粒未发生破碎,表明生成的 Bond 键稳定,与物理试验所表现的力学性能相符。而当黏结半径大于 0.3 mm 时,颗粒再次无法生成,这是由于生成的 Bond 黏结键过大,致使颗粒生成后黏结成团,无法保持原有的颗粒形状。

不同单位刚度水平下模型的颗粒状态如表 12。单位法向刚度小于 $2.59 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$ 、单位切向刚度小于 $9.07 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,刚度较低导致颗粒受到冲击作用后,破碎模型之间的接触变形较大,颗粒内部出现应力集中,从而导致颗粒破碎。随着刚度的增加,颗粒内部损耗减小,故颗粒呈现未碎状态。

表11 不同黏结半径对模型颗粒状态的影响

Table 11 The influence of different bond radius on the particle state of the model

组别 Group	单位法向刚度 Unit normal stiffness $/(\times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-3})$	单位切向刚度 Unit tangential stiffness $/(\times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-3})$	临界法向力 Critical normal force $/(\times 10^8 \text{ Pa})$	临界切向力 Critical tangential force $/(\times 10^8 \text{ Pa})$	黏结半径 Bond radius /mm	颗粒状态 Particle state
1	3.88	1.36	9.44	3.49	0.150	无法生成 Ugenerate
2	3.88	1.36	9.44	3.49	0.175	半损 Semi-broken
3	3.88	1.36	9.44	3.49	0.200	未碎 Unbroken
4	3.88	1.36	9.44	3.49	0.225	未碎 Unbroken
5	3.88	1.36	9.44	3.49	0.250	未碎 Unbroken
6	3.88	1.36	9.44	3.49	0.275	未碎 Unbroken
7	3.88	1.36	9.44	3.49	0.300	无法生成 Ugenerate

表12 不同单位刚度水平对模型颗粒状态的影响

Table 12 The influence of different unit stiffness levels on the particle state of the model

组别 Group	单位法向刚度 Unit normal stiffness $/(\times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-3})$	单位切向刚度 Unit tangential stiffness $/(\times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-3})$	临界法向力 Critical normal force $/(\times 10^8 \text{ Pa})$	临界切向力 Critical tangential force $/(\times 10^8 \text{ Pa})$	黏结半径 Bond radius /mm	颗粒状态 Particle state
1	2.59	0.907	9.44	3.49	0.2	破碎 Broken
2	3.24	1.130	9.44	3.49	0.2	未碎 Unbroken
3	3.88	1.360	9.44	3.49	0.2	未碎 Unbroken
4	4.53	1.590	9.44	3.49	0.2	未碎 Unbroken
5	5.18	1.810	9.44	3.49	0.2	未碎 Unbroken

不同临界应力水平下模型的颗粒状态如表 13。当临界法向力小于 $9.44 \times 10^7 \text{ Pa}$ 、临界切向力小于 $3.49 \times 10^7 \text{ Pa}$ 时, 颗粒发生破碎, 这是由于颗粒可承受的极限冲击力过小, 在很小的冲击作用下便发生破碎。随着临界应力的增大, 颗粒的抗碎性增加。而当临界法向力超过 $9.44 \times 10^{11} \text{ Pa}$ 、临界切向力超过 $3.49 \times 10^{11} \text{ Pa}$ 时, 颗粒再次破碎, 这是由于此时的颗粒能够承受巨大的冲击外力, 致使受冲击后的变形作用加剧, 加大了填充单元球体的重叠量, 致使离散元计算出错, 引发颗粒炸裂。

表13 不同临界应力水平对模型颗粒状态的影响

Table 13 The influence of different critical stress levels on the particle state of the model

组别 Group	单位法向刚度 Unit normal stiffness $/(\times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-3})$	单位切向刚度 Unit tangential stiffness $/(\times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-3})$	临界法向力 Critical normal force $/(\times 10^8 \text{ Pa})$	临界切向力 Critical tangential force $/(\times 10^8 \text{ Pa})$	黏结半径 Bond radius /mm	颗粒状态 Particle state
1	3.88	1.36	0.944	0.349	0.2	破碎 Broken
2	3.88	1.36	9.440	3.490	0.2	未碎 Unbroken
3	3.88	1.36	94.400	34.900	0.2	未碎 Unbroken
4	3.88	1.36	944.000	349.000	0.2	未碎 Unbroken
5	3.88	1.36	9 440.000	3 490.000	0.2	破碎 Broken

根据表 11、表 12 和表 13 中未发生破碎的试验组确定破碎参数变量的取值范围(表 14), 在该参数范围内可生成稳定的烟丝破碎颗粒, 可用于最优破碎参数的研究。

表14 破碎参数标定试验中各参数变量的取值范围

Table 14 The value range of each parameter variable in the crushing parameter calibration test

试验参数 Test parameters	水平范围 Range of level	
黏结半径 Bond radius/mm	-1	1
单位法向刚度 Unit normal stiffness/ $(\times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-3})$	0.2	0.275
临界法向力 Critical normal force/ $(\times 10^8 \text{ Pa})$	3.24	5.18
	9.44	944

2.2.3 基于Box-Behnken试验的破碎参数标定 依据表14中破碎参数的取值范围进行破碎参数的响应面试验设计,试验方案如表15,按照每组试验方案分别进行重球跌落数值模拟,得到15组试验的破碎高度取值。

表15 烟丝破碎模型参数标定的Box - Behnken试验方案及结果

Table 15 The scheme and results of the Box-Behnken experimental for calibrating parameters in the tobacco broken model

试验 Test	黏结半径 Bond radius /mm	单位法向刚度 Unit normal stiffness /($\times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$)	单位切向刚度 Unit tangential stiffness /($\times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$)	临界法向力 Critical normal force /($\times 10^8 \text{ Pa}$)	临界切向力 Critical tangential force /($\times 10^8 \text{ Pa}$)	破碎高度 Crushing height /mm
1	0.200 0	5.18	1.81	477.00	176.00	375
2	0.237 5	5.18	1.81	944.00	349.00	362
3	0.237 5	4.21	1.47	477.00	176.00	368
4	0.275 0	3.24	1.13	477.00	176.00	221
5	0.237 5	5.18	1.81	9.44	3.49	160
6	0.237 5	3.24	1.13	9.44	3.49	680
7	0.237 5	4.21	1.47	477.00	176.00	166
8	0.275 0	4.21	1.47	944.00	349.00	43
9	0.237 5	3.24	1.13	944.00	349.00	620
10	0.200 0	4.21	1.47	944.00	349.00	305
11	0.200 0	4.21	1.47	9.44	3.49	247
12	0.200 0	3.24	1.13	477.00	176.00	185
13	0.275 0	5.18	1.81	477.00	176.00	167
14	0.237 5	4.21	1.47	477.00	176.00	585
15	0.275 0	4.21	1.47	9.44	3.49	750

通过 Design-Expert 对表 15 中的 Box - Behnken 试验结果进行多元回归拟合,结果如表 16,得到各因素与响应值破碎高度 H 的二阶回归方程为:

$$H=368.33+259.87A-25.88B+12.00C+39.50AB+14.25AC+42.75BC+99.33A^2-114.17B^2-20.92C^2 \quad (7)$$

表16 烟丝破碎模型参数标定的Box - Behnken试验回归模型方差分析

Table 16 Variance analysis of the Box-Behnken experimental regression model for calibrating parameters in the tobacco broken model

来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 df	均方和 Mean square	f	P
模型 Model	6.50 $\times 10^5$	9	72 260.72	185.43	< 0.000 1
A 黏结半径 Bond radius	5.38 $\times 10^5$	1	5.38 $\times 10^5$	1 379.8	< 0.000 1
B 单位法向刚度 Unit normal stiffness	5 356.13	1	5 356.13	13.74	0.013 9
C 临界法向力 Critical normal force	1 035.13	1	1 035.13	2.66	0.164 1
AB	6 241	1	6 241	16.02	0.010 3
AC	676	1	676	1.73	0.244 9
BC	7 310.25	1	7 310.25	18.76	0.007 5
A ²	35 975.39	1	35 975.39	92.32	0.000 2
B ²	47 600.16	1	47 600.16	122.15	0.000 1
C ²	1 713.39	1	1 713.39	4.4	0.090 1
残差 Residual	1 948.42	5	389.68		
失拟项 Lack of fit	1 863.75	3	621.25	14.68	0.064 5
纯误差 Pure error	84.67	2	42.33		
总和 Sum	6.52 $\times 10^5$	14			
$R^2=99.7\%$	$R^2_{Adj}=99.16\%$				

模型整体 $P < 0.0001$, 表明模型极其显著。决定系数 R^2 为 99.7%, 调整系数 R^2_{Adj} 为 99.16%, 失拟项 $P > 0.05$, 表明模型不失拟。变异系数为 5.66%, 表明模型拟合度较好。

利用 Design-Expert 求得破碎模型参数的最优解为黏结半径 0.216 mm、单位法向刚度 $4.62 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$ 、单位切向刚度 $1.62 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$ 、临界法向力 $5.10 \times 10^{10} \text{ Pa}$ 、临界切向力 $1.89 \times 10^{10} \text{ Pa}$ 。在该参数组合下进行 3 次跌落验证试验, 其破碎高度分别为 210.5, 214, 212.5 mm, 与物理试验相对误差 0.82%。

2.2.4 基于单轴压缩试验的破碎参数验证 烟丝单轴压缩的物理和仿真试验的应力应变曲线如图 9。由图 9 可知, 单轴压缩的物理试验与仿真所得的应力应变曲线趋势基本一致。随着压缩载荷不断增大, 烟丝试样的孔隙率逐步减小, 应变增速高于应力, 烟丝的堆积密度逐步增大, 直至接近烟丝试样的变形极限。此时随着压头的进一步施压, 应力的增速将逐渐高于应变。在达到烟丝的最大压缩位移 35 mm 时, 物理试验所受载荷为 10 008.6 N, 数值模拟试验所受载荷为 10 462.54 N, 误差为 4.53%, 进一步验证了烟丝破碎模型及其参数标定结果的可靠性。

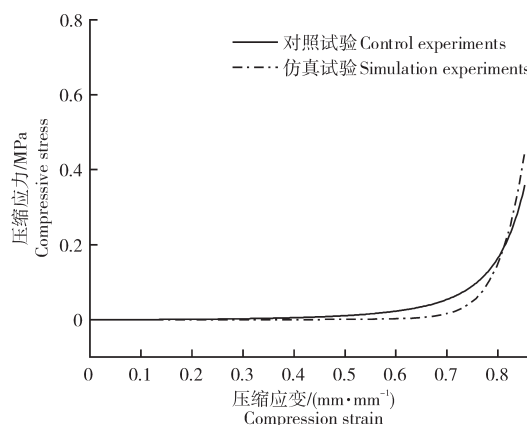


图 9 烟丝单轴压缩的应力-应变曲线

Figure 9 Stress-strain curves of tobacco model under uniaxial compression

3 讨论与结论

现有文献报道中, 为了提高计算效率, 烟丝的相关模拟研究往往采用简单的球形和柱状颗粒进行, 忽略了烟丝自身尺寸结构对流场运动的干扰^[25-27]。同时, 离散元模拟的准确性与模型参数息息相关, 但在一些 CFD-DEM 研究中, 由于烟丝长径比大、易碎等特殊的物理性质, 烟丝模型的离散元参数设置模糊, 模型参数始终缺乏规范可靠的标定结果。此外, 烟丝造碎情况决定了烟丝的最终质量, 现有的烟丝造碎模拟单以气相的流速分布来间接表征烟丝的造碎程度, 缺乏烟丝直接的造碎模拟指标。因此, 针对上述问题, 本研究考虑进行多尺度、不规则形态的烟丝离散元颗粒构建, 并基于堆积角试验进行离散元接触参数的标定。同时, 构建烟丝破碎模型, 提出以 Bond 键的断裂作为烟丝造碎的数值模拟指标, 并完成破碎参数的标定。

本研究利用 SIFT 结构相似算法匹配各烟丝结构的相似水平, 并依据相似度结果排序筛选出的烟丝真实形状建立了各层级烟丝颗粒的离散元模型。以堆积角试验进行了烟丝离散元模型的虚拟标定, 结合 Plackett-Burman 试验确定了影响仿真的显著性参数, 利用最陡爬坡试验确定了最优值的取值范围, 最后利用 Box-Behnken 响应面分析获得了显著性因素之间的交互作用, 根据优化后的二阶回归方程, 确定了烟丝离散元参数的最优组合: 烟丝颗粒-烟丝颗粒静摩擦系数、颗粒间的滚动摩擦系数、颗粒与铝板动摩擦系数的最优参数解分别为 0.49, 0.03, 0.12。通过 3 次平行试验验证, 最优参数组合所得堆积角与试验误差为 2.9%, 证实了烟丝 Hertz-Mindlin 离散元模型和基础参数标定结果的可靠性。同时结合重球跌落试验进行参数标定, 以破碎高度 212.5 mm 为响应值, 求得了烟丝破碎模型的最优参数组合为黏结半径 0.216 mm、单位法向刚度 $4.62 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$ 、单位切向刚度 $1.62 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$ 、临界法向力 $5.10 \times 10^{10} \text{ Pa}$ 、临界切向力 $1.89 \times 10^{10} \text{ Pa}$, 并利用最优解参数对烟丝群进行了单轴压缩验证试验, 证实了烟丝 Bonding 破碎模型和破碎参数标定结果的可靠性。

参考文献:

- [1] 吴孟宸, 丛锦玲, 闫 琴, 等. 花生种子颗粒离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(23): 30-38.
WU M C, CONG J L, YAN Q, et al. Calibration and experiments for discrete element simulation parameters of peanut seed particles[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(23): 30-38.
- [2] 刘 瑞, 李衍军, 刘忠军, 等. 包衣玉米种子离散元参数分析与标定[J]. 农业机械学报, 2021, 52(增刊 1): 1-8, 18.
LIU R, LI Y J, LIU Z J, et al. Analysis and calibration of discrete element parameters of coated maize seed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(S1): 1-8, 18.
- [3] CHIARAVALLE A G, COTABARREN I M, PIÑA J. DEM breakage calibration for single particle fracture of maize kernels under a par-

- article replacement approach[J].*Chemical Engineering Research and Design*, 2023,195:151-165.
- [4] LU C Y,GAO Z,LI H W,et al.An ellipsoid modelling method for discrete element simulation of wheat seeds[J].*Biosystems Engineering*, 2023,226:1-15.
- [5] 刘志侠,吴国振,于永强,等.花生荚果生物力学特性研究[J].*沈阳农业大学学报*,2023,54(6):732-740.
LIU Z X,WU G Z,YU Y Q,et al.Study on biomechanical characteristics of peanut pod[J].*Journal of Shenyang Agricultural University*, 2023,54(6):732-740.
- [6] 郝建军,龙思放,李建昌,等.麻山药种植田沙壤土流动性离散元模型颗粒放尺效应[J].*农业工程学报*,2020,36(21):56-64.
HAO J J,LONG S F,LI J C,et al.Effect of granular ruler in discrete element model of sandy loam fluidity in Ma yam planting field[J].*Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2020,36(21):56-64.
- [7] 宋少龙,汤智辉,郑炫,等.新疆棉田耕后土壤模型离散元参数标定[J].*农业工程学报*,2021,37(20):63-70.
SONG S L,TANG Z H,ZHENG X,et al.Calibration of the discrete element parameters for the soil model of cotton field after plowing in Xinjiang of China[J].*Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2021,37(20):63-70.
- [8] ZU E X,ZHOU P,JIANG Z H.Discrete element method of coke accumulation:Calibration of the contact parameter[J].*IFAC-PapersOn-Line*,2018,51(21):241-245.
- [9] XIA R,LI B,WANG X W,et al.Measurement and calibration of the discrete element parameters of wet bulk coal[J].*Measurement*,2019, 142:84-95.
- [10] BU P,LI Y L,ZHANG X,et al.A calibration method of discrete element contact model parameters for bulk materials based on experimental design method[J].*Powder Technology*,2023,425:118596.
- [11] 刘禹辰,张锋伟,宋学锋,等.基于离散元法玉米秸秆双层粘结模型力学特性研究[J].*东北农业大学学报*,2022,53(1):45-54.
LIU Y C,ZHANG F W,SONG X F,et al.Study on mechanical properties for corn straw of double-layer bonding model based on discrete element method[J].*Journal of Northeast Agricultural University*,2022,53(1):45-54.
- [12] 廖宜涛,廖庆喜,周宇,等.饲料油菜薹期收获茎秆破碎离散元仿真参数标定[J].*农业机械学报*,2020,51(6):73-82.
LIAO Y T,LIAO Q X,ZHOU Y,et al.Parameters calibration of discrete element model of fodder rape crop harvest in bolting stage[J].*Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2020,51(6):73-82.
- [13] 张兆国,徐红伟,薛浩田,等.三七茎秆离散元参数标定与试验[J].*农业机械学报*,2023,54(11):61-70,91.
ZHANG Z G,XU H W,XUE H T,et al.Calibration and experiment of discrete element parameters of panax notoginseng stem[J].*Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2023,54(11):61-70,91.
- [14] 张喜瑞,胡旭航,刘俊孝,等.香蕉秸秆离散元仿真粘结模型参数标定与试验[J].*农业机械学报*,2023,54(5):121-130.
ZHANG X R,HU X H,LIU J X,et al.Calibration and verification of bonding parameters of banana straw simulation model based on discrete element method[J].*Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2023,54(5):121-130.
- [15] 国家烟草专卖局.烟草及烟草制品试样的制备和水分测定烘箱法:YC/T 31—1996[S].北京:中国标准出版社,1996.
State Tobacco Monopoly Administration.Tobacco and tobacco products—Preparation of test sample and determination of water content—Over method:YC/T 31—1996[S].Beijing:China Standards Press,1996.
- [16] 国家烟草专卖局.烟丝整丝率、碎丝率的测定方法:YC/T 178—2003[S].北京:中国标准出版社,2004.
State Tobacco Monopoly Administration.Measurement of whole cut rate and broken cut rate:YC/T 178—2003[S].Beijing: China Standards Press,2004.
- [17] 国家烟草专卖局.烟丝表观密度、真密度和内孔容积的测定:YC/T 473—2013[S].北京:中国标准出版社,2013.
State Tobacco Monopoly Administration.Determination of apparent density,true density and inner pore volume of cut tobacco:YC/T 473—2013[S].Beijing:China Standards Press,2013.
- [18] 吴迎.基于SIFT和最邻近匹配的商品图像相似度算法[J].*计算机与现代化*,2020(10):69-75.
WU Y.Product image similarity algorithm based on SIFT and nearest neighbor matching[J].*Computer and Modernization*,2020(10):69-75.
- [19] 马进,郝宁宇,李红宇.图像相似性改进算法[J].*计算机应用*,2022,42(增刊1):287-291.
MA J,HAO N N,LI H Y.Improved algorithm of image similarity[J].*Journal of Computer Applications*,2022,42(S1):287-291.
- [20] 孟凡海,李玮,赵欢,等.基于离散元法的岩石单轴压缩模型建立及参数校核[J].*能源与环保*,2019,41(8):67-72,77.
MENG F H,LI W,ZHAO H,et al.Establishment of rock uniaxial compression model and parameters check based on discrete element method[J].*China Energy and Environmental Protection*,2019,41(8):67-72,77.
- [21] SU Y,XU Y,CUI T,et al.Determination and interpretation of bonded-particle model parameters for simulation of maize kernels[J].*Biosystems Engineering*, 2021,210:193-205.
- [22] HOSHISHIMA C,OHSAKI S,NAKAMURA H,et al.Parameter calibration of discrete element method modelling for cohesive and non-

- spherical particles of powder[J]. Powder Technology, 2021, 386: 199-208.
- [23] FANG W Q, WANG X Z, HAN D L, et al. Review of material parameter calibration method[J]. Agriculture, 2022, 12(5): 706.
- [24] 樊成赛, 何瑞银, 施印炎, 等. 有机无机混合肥料离散元参数标定方法研究[J]. 南京农业大学学报, 2024, 47(2): 402-413.
FAN C S, HE R Y, SHI Y Y, et al. Study on discrete element parameter calibration method for organic inorganic mixed fertilizers[J]. Journal of Nanjing Agriculture University, 2024, 47(2): 402-413.
- [25] 查蕾蕾, 黄亚宇, 杜林昕. 基于 EDEM 的滚筒烘丝过程物料运动行为研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2022, 60(6): 32-35, 40.
ZHA L L, HAUNG Y Y, DU L X. Study on material movement behavior in drum drying process based on EDEM[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2022, 60(6): 32-35, 40.
- [26] 任志立. 气动分离残烟烟丝的结构设计及数值模拟研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
REN Z L. Structural design and numerical simulation of pneumatic separation of defective cigarettes[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020.
- [27] 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 study and structural design of gas-solid two-phase flow in a secondary separation device[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019.
- [28] 陶 闾, 陆佳平, 方继凡. 基于 EDEM 的猴魁茶叶充填过程仿真研究[J]. 轻工机械, 2022, 40(3): 94-100.
TAO W, LU J P, FANG J F. Simulation study of houkui tea filling process based on EDEM[J]. Light Industry Machinery, 2022, 40(3): 94-100.
- [29] 李 兵. 基于 EDEM 的茶叶滚筒杀青机参数优化及试验研究[J]. 中国茶叶加工, 2021(3): 24-33.
LI B. Parameter optimization and experimental research of tea cylinder fixation machine based on EDEM[J]. China Tea Processing, 2021(3): 24-33.
- [30] 卢 青, 王子平. 3T2R 新型混联茶叶筛分机机构设计及筛分性能仿真[J]. 林业机械与木工设备, 2018, 46(5): 34-40.
LU Q, WANG Z P. Design and performance simulation of 3T2R hybrid tea sieving mechanism[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2018, 46(5): 34-40.
- [31] 郑新虎. 梗签分离装置中气流的流动分析及仿真研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
ZHENG X H. Flow analysis and simulation of air flow in a stems separation unit [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018.
- [32] 蒋亚军, 廖宜涛, 廖庆喜. 基于 P-K 失效模型的饲用油菜茎秆仿真参数标定[J]. 沈阳农业大学学报, 2022, 53(3): 309-318.
JIANG Y J, LIAO Y T, LIAO Q X. Simulation parameters calibration for P-K failure model of fodder rapeseed stalk[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2022, 53(3): 309-318.
- [33] 焦傲鹏. 螺旋卸船机取料过程颗粒破碎的离散元仿真研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
JIAO A P. Discrete element simulation study on particle crushing in the reclaiming process of screw ship unloader[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.
- [34] TIAN Y Y, ZENG Z W, GONG H, et al. Simulation of tensile behavior of tobacco leaf using the discrete element method (DEM)[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 205: 107570.
- [35] 金 浩, 蒋明洋, 徐 超, 等. 基于离散元法的柔性片烟建模及仿真参数标定[J]. 沈阳农业大学学报, 2023, 54(5): 563-571.
JIN H, JIANG M Y, XU C, et al. Modeling and simulation parameters calibration of flexible tobacco strips based on discrete element[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2023, 54(5): 563-571.