



李晓,冯东民,郭朋玮,等.应用离散元法表征烟丝尺寸对其柔軟性的力学影响[J].轻工学报,2025,40(3):86-94.

LI X, FENG D M, GUO P W, et al. Mechanical effects of cut tobacco sizes on softness characterized by discrete element method[J]. Journal of Light Industry, 2025, 40(3): 86-94. DOI: 10.12187/2025.03.010

应用离散元法表征烟丝尺寸对其柔軟性的力学影响

李晓¹,冯东民¹,郭朋玮²,方世航³,李宜馨¹,芦柯¹,纪晓楠⁴

1. 郑州轻工业大学 烟草科学与工程学院,河南 郑州 450001;
2. 吉林烟草工业有限责任公司 技术中心,吉林 长春 130033;
3. 河南中烟工业有限责任公司 南阳卷烟厂,河南 南阳 473000;
4. 河南中烟工业有限责任公司 技术中心,河南 郑州 450016

摘要:为明确烟丝不同尺寸及比例对其柔軟性的影响,探究引起烟丝柔軟性差异的原因,借助离散元法构建的质构仪仿真模型测量烟丝柔軟性,分析各尺寸烟丝在测量过程中的受力差异及对力链演变的影响,并通过调整烟丝尺寸配比,分析烟丝柔軟性的变化规律。结果表明:大于3.35 mm和小于1.00 mm的烟丝占比越高,烟丝柔軟性越差;1.00~2.50 mm和2.50~3.35 mm的烟丝占比越高,烟丝柔軟性越佳;2.50~3.35 mm的烟丝对测量过程中的烟丝受力表现影响最大。烟丝平均受力随烟丝尺寸的下降而下降,且变得更加均匀。柔軟性好的烟丝样品,烟丝间中等及高强度力链数量更少,中等强度力链分布更均匀。各尺寸烟丝与烟丝整体之间的中低强度接触比例随着烟丝尺寸降低而增加。合理提高中丝率和短丝率有利于改善烟丝柔軟性,较高的长丝率和碎丝率会使烟丝柔軟性变差。适当提高1.00~3.35 mm烟丝占比、降低3.35 mm以上及1.00 mm以下烟丝占比,有利于整体改善烟丝在外部载荷作用下的力学性能,提高其柔軟性。

关键词:离散元法;配比优化;烟丝尺寸;烟丝柔軟性;力学性能

中图分类号:TS572.01 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2025)03-0086-09

0 引言

当前,制丝线上常用含水率、填充值、烟丝结构等物理特性指标衡量成品烟丝的品质^[1],但在实际生产过程中,在不同批次烟丝物理质量无显著差异的情况下,卷烟质量指标、设备效率、过程损耗等烟丝使用性能仍存在明显差异^[2]。究其原因在于现

有的烟丝物理特性指标尚不完善,未能全面、真实地反映烟丝品质^[3],如烟丝在卷制过程中出现不适用情况时,生产操作人员往往采用眼观、手摸等感官评价方法判断烟丝是否僵硬、是否柔軟,评判结果具有一定的主观性和不稳定性。

近年来,研究者对烟叶与再造烟叶柔軟性进行了大量的研究。付秋娟等^[4]对全国50个主产烟区300

收稿日期:2024-05-28;修回日期:2024-10-21;出版日期:2025-06-15

基金项目:河南中烟工业有限责任公司重点项目(AW201911)

作者简介:李晓(1966—),女,河南省南阳市人,郑州轻工业大学教授,主要研究方向为卷烟加工技术。E-mail:519389150@qq.com

通信作者:纪晓楠(1988—),女,河南省许昌市人,河南中烟工业有限责任公司工程师,主要研究方向为烟草加工技术。E-mail:hnzy_jxn@163.com

份烤烟样品的柔韧性、物理指标、化学成分进行了相关分析、逐步回归和通径分析,发现烤烟柔韧性与主要理化指标密切相关,尤其是烟叶总糖、还原糖和钾对烟叶柔韧性有直接作用。陈天才等^[5]选用3个水平的K326品种烟叶,从外观质量、常规化学成分和感官质量3个方面进行鉴定分析,发现K326品种烟叶的柔韧性与叶片结构、油分、身份、还原糖含量等呈极显著正相关。沈进等^[6]利用质构仪测定造纸法再造烟叶柔韧性时发现,造纸法再造烟叶含水率对柔韧性有显著影响,含水率越高,柔韧性越大。在实际生产过程中,烟丝这种丝状物料集合体的柔韧性与卷接质量关系更为密切,而烟丝柔韧性^[7]定量评价方法的提出,丰富了烟丝质量评价指标,但针对烟丝柔韧性影响因素的研究鲜有报道,因此分析影响烟丝柔韧性变化的机理有重要意义。李博宇等^[8]提出了数值模拟方法在工农业中的应用前景,其中离散元法(Distinct Element Method, DEM)与传统的连续介质数值模拟方法相比,能够更好地模拟颗粒间的复杂相互作用,在表征颗粒材料的离散分布状态、颗粒接触及运动规律方面具有明显的优越性^[9-10],可为烟草工艺优化提供细观力学分析方法。吴玉生等^[11]采用离散元法模拟了烟丝加香机滚筒的抛料特性,优化了抄板数量和结构、滚筒转速及喷雾装置。汤达伟等^[12]采用离散元法模拟了ZB28(X6S)高速包装机组烟库,与上机验证结果一致。朱立平等^[13]采用离散元法建立了烟丝颗粒传热模型,提出采用“球形颗粒”模拟时存在较大误差,故构建了细杆-铰链模型以降低模拟烟丝的误差。

虽然离散元法在烟草行业已得到较广泛应用^[14-16],但其在烟草自身物理特性方面的应用尚未见报道。基于此,本研究拟应用离散元法建立烟丝柔韧性测量过程的仿真模型,提取过程力学数据探究烟丝柔韧性的检测机理,结合灰色T型关联度分析确定不同尺寸烟丝对烟丝柔韧性的影晌,探寻引起烟丝柔韧性差异的原因,以期为优化烟丝结构、提高烟丝适用性提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料与仪器

实验材料:A牌号配方烟丝,由河北中烟工业有

限责任公司提供。

实验仪器:TA. XT plus型质构仪,英国Stable Micro System公司;KBF240型恒温恒湿箱,德国Binder公司;PL203型电子天平(感量0.001 g),梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;Y2SJO型多功能检测振筛(筛网规格10 mm、7 mm、5 mm、4 mm、3.35 mm、2.5 mm和1 mm),徐州市铁建机械制造有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 配方烟丝取样 取加香后的A牌号配方烟丝共30个批次,每批次取4000 g,以四分法缩至1000 g作为该批次配方烟丝样品,放入温度为(22±1)℃、相对湿度为(60±2)%的恒温恒湿箱内平衡48 h,待测。

1.2.2 烟丝柔韧性测量 参考文献[7]的方法,使用质构仪测量各批次配方烟丝的柔韧性S,单位为g/s。测量参数如下:圆板型探头压板半径为22.5 mm,测前、测中速度均为2 mm/s;初始压缩高度为48 mm(自测量筒内部底面起计算),压缩距离为11 mm;样品质量为8 g;测量筒高度为80 mm,内部半径为25 mm,深度为70 mm。为保证每次测量过程重现性一致,测量前统一将探头压板下边缘调至距离测量筒顶部10 mm处。每批次配方烟丝均测量3次,结果取平均值,并将样品的最大数值记录为S_{max},样品的最小数值记录为S_{min}。

1.2.3 烟丝尺寸测量 参考《卷烟配方烟丝结构的测定》(YC/T 289—2009)^[17],使用多功能检测振筛对各批次配方烟丝进行筛分,振筛工作参数如下:振动频率为40 Hz,振动时间为10 min。每批次均筛分3次,每次筛分使用300 g烟丝,结果取平均值。以A1—A8代表不同长度范围内的烟丝(以筛网孔径计),其中:A1 长度>10.00 mm、7.00 mm<A2 长度≤10.00 mm、5.00 mm<A3 长度≤7.00 mm、4.00 mm<A4 长度≤5.00 mm、3.35 mm<A5 长度≤4.00 mm、2.50 mm<A6 长度≤3.35 mm、1.00 mm<A7 长度≤2.50 mm、A8 长度<1.00 mm。将筛分后的烟丝按上述分类分别回收,供后续烟丝尺寸配比优化。

1.2.4 烟丝仿真模型建立 若直接将烟丝抽象简化为离散元仿真模型中常见的软球颗粒模型会导致模拟结果与实际测量结果有极大偏差,故参照实测A

牌号配方烟丝结构与典型烟丝外观,使用 EDEM 2022 离散元仿真软件,建立不同长度的带有弯曲、翻转结构的烟丝模型。考虑建模难度和计算力需求,本实验使用纯叶丝叶组配方的 A 牌号成品烟丝作为对照。图 1 为烟丝仿真模型,其中模型编号①—⑧分别对应烟丝编号 A1—A8。

1.2.5 烟丝柔软性测量过程仿真模型建立 使用 EDEM 2022 软件,参考烟丝柔软性测量方法,建立基于离散元法的烟丝柔软性测量过程仿真模型。质构仪实物图与仿真模型图见图 2。

离散元仿真模型的参数使用质构仪测量烟丝柔软性时的参数,探头压板运行速度、初始间距等也与其保持一致,烟丝模型于测量筒顶部生成。设定模拟计算的 0~1 s 为烟丝模型生成并自然下落到

测量筒内的时间;1~24 s 内,探头压板以 2 mm/s 的速度沿 z 轴负向匀速移动。可计算得到在 17 s 时探头压板下边缘到达初始压缩高度 48 mm 处,5.5 s 后(22.5 s 时)探头压板下边缘自初始压缩高度移动了 11 mm,到达终止压缩高度。故对于仿真模型,开始演算后 17~22.5 s 的探头压板应力随时间变化的曲线拟合斜率为烟丝柔软性数值。

根据烟丝的物理特性和力学性质,烟丝与烟丝之间的接触模型选择为 EEPA (The Edinburgh Elasto-Plastic Adhesion) 模型^[18-19],烟丝与测量筒之间的接触模型选择为 Hertz-Mindlin (no slip) 模型^[20]。仿真模型参数设置参考已有研究^[14,21],并结合实际情况进行调整,见表 1。其中,由于模拟计算需要,烟丝密度以表观密度^[13,22]计。

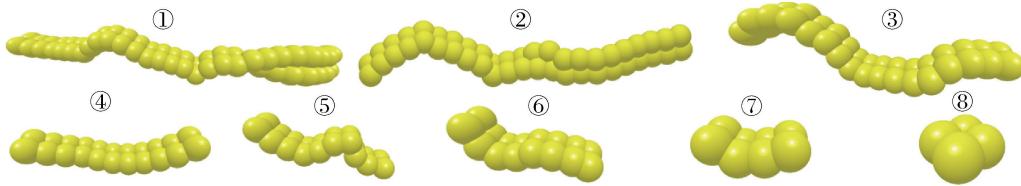


图 1 烟丝仿真模型
Fig. 1 Simulation model of cut tobacco

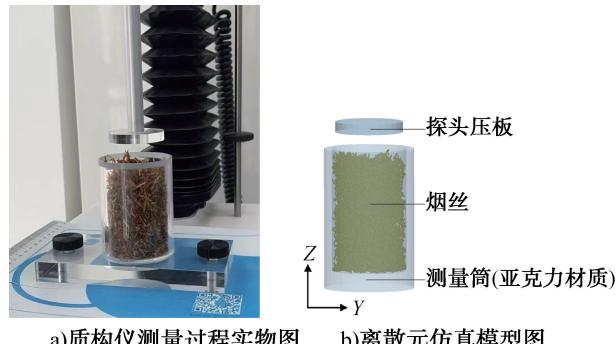


图 2 质构仪实物图与仿真模型图
Fig. 2 Photos of the texture analyzer and simulation model

1.3 数据处理与分析

使用 EDEM 2022 软件的后处理模块提取并统计仿真模拟的过程数据,采用 Origin 2021 和 SPSS 26.0 软件统计烟丝尺寸和柔软性数据、仿真模拟的过程数据,并进行相关性分析及灰色 T 型关联度分析。

灰色 T 型关联度^[23]在现有的灰色关联度与 T

表 1 仿真模型参数

Table 1 Simulation model parameters

参数类型	参数名称	数值
物料参数	烟丝泊松比	0.35
	烟丝密度/(kg·m ⁻³)	850
	烟丝剪切模量/Pa	1.5×10 ⁶
	亚克力泊松比	0.2
	亚克力密度/(kg·m ⁻³)	1200
	亚克力剪切模量/Pa	7.2×10 ¹⁰
接触参数	烟丝-烟丝碰撞恢复系数	0.25
	烟丝-烟丝静摩擦因数	0.61
	烟丝-烟丝动摩擦因数	0.20
	烟丝-亚克力碰撞恢复系数	0.43
	烟丝-亚克力静摩擦因数	0.39
	烟丝-亚克力动摩擦因数	0.03

型关联度模型的基础上有所改进,可以反映序列间的正、负相关性,且具备对称性、唯一性及无量纲化后的保序性,计算方法如下:以仿真模拟过程中探头压板所感受到的力为参考序列 $X_0(k)$,各尺寸烟丝所受平均压缩力为比较序列 $X_i(k)$,参照式①计

算 S_{\max} 和 S_{\min} 的参考序列 $X_0(k)$ 、 $X'_0(k)$ 与比较序列 $X_i(k)$ 、 $X'_i(k)$ 对应的差值序列 $Y_0(k)$ 和 $Y_i(k)$ 。

$$\begin{cases} Y_0(k) = X_0(k) - X'_0(k) \\ Y_i(k) = X_i(k) - X'_i(k) \end{cases} \quad ①$$

其中, $i = 1, 2, \dots, 8$, 对应表示 A1—A8 编号的烟丝。

利用式②③对各差值序列进行均值化处理, 有:

$$\begin{cases} Z_0(k) = Y_0(k) / \bar{Y}_0 \\ Z_i(k) = Y_i(k) / \bar{Y}_i \end{cases} \quad ②$$

$$\xi_i(k) = \frac{\operatorname{sgn}(Z_0(k) \cdot Z_i(k))}{1 + 0.5 \times ||Z_0(k)|| - ||Z_i(k)|| + 0.5 \times \left(1 - \frac{\min(||Z_0(k)||, ||Z_i(k)||)}{\max(||Z_0(k)||, ||Z_i(k)||)}\right)} \quad ④$$

$$r_i = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^{n-1} \xi_i(\Delta t_k) \quad ⑤$$

2 结果与分析

2.1 烟丝尺寸与柔性的关系分析

2.1.1 烟丝尺寸与柔性的测量结果分析 烟丝尺寸配比及柔性的描述性统计结果见表 2。由表 2 可知, A 牌号烟丝柔韧性为 $14.36 \sim 24.95 \text{ g/s}$, 变异系数为 15.83% , 属于中等变异^[24], 说明不同批次烟丝之间的柔韧性有较大波动; A1 烟丝占比的变异系数为 39.71% , 而 A2—A8 烟丝占比的变异系数均 $< 15.00\%$, 属于弱变异, 说明除 A1 烟丝之外不同批次间烟丝尺寸占比差异较小。按照制丝生产过程中常用的整丝率计量, 不同批次之间的整丝率变异系数 $< 5.00\%$, 没有明显差异。

表 2 烟丝尺寸配比及柔性的描述性统计结果

Table 2 Descriptive statistics for cut tobacco size ratios and softness

指标	最小值	最大值	平均值	变异系数/%
柔韧性/ ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$)	14.36	24.95	19.92	15.83
A1	0.24	3.12	1.95	39.71
A2	3.10	5.28	4.19	14.19
烟丝占比/%	6.15	8.97	7.34	9.32
A4	7.46	11.63	9.47	10.41
A5	10.19	14.93	12.01	9.44
A6	24.72	32.67	28.91	6.54
A7	29.81	35.37	32.44	4.20
A8	2.86	4.39	3.72	11.53
整丝率/%	60.89	66.26	63.87	1.92

$$\begin{cases} \bar{Y}_0 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |Y_0(k)| \\ \bar{Y}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |Y_i(k)| \end{cases} \quad ③$$

当比较序列 $Z_0(k)$ 、 $Z_i(k)$ 不同时为 0 时, 利用式④计算比较序列 $Z_i(k)$ 对参考序列 $Z_0(k)$ 的灰色 T 型关联系数 $\xi_i(k)$, 并参考式⑤计算灰色 T 型关联度 r_i :

$$\begin{aligned} & 1 \\ & 1 + 0.5 \times \left(1 - \frac{\min(||Z_0(k)||, ||Z_i(k)||)}{\max(||Z_0(k)||, ||Z_i(k)||)}\right) \end{aligned} \quad ④$$

2.1.2 烟丝尺寸与柔性的相关性分析 烟丝尺寸与柔性的相关性分析见表 3。由表 3 可知, 柔韧性数值与 A4、A8 烟丝占比呈极显著正相关, 与 A1、A2、A3、A5 烟丝占比呈显著正相关; 与 A6、A7 烟丝占比呈极显著负相关。根据烟丝柔韧性测量方法^[1]可知, 烟丝柔韧性数值越大, 压缩过程中探头感应到的力随时间增长越快, 说明烟丝难以被压缩, 柔韧性较差; 反之, 烟丝柔韧性数值越小, 其柔韧性越好。因此, 随着 A6、A7 烟丝占比的增加, 其柔韧性数值降低, 柔韧性变好; 而随着 A1、A2、A3、A4、A5、A8 烟丝占比的增加, 其柔韧性数值增加, 柔韧性变差。整体上, 减少长丝率 ($\geq 3.35 \text{ mm}$) 和碎丝率 ($\leq 1.00 \text{ mm}$)、增加中丝率 ($2.50 \sim 3.35 \text{ mm}$) 和短丝率 ($1.00 \sim 2.50 \text{ mm}$) 有利于改善烟丝柔韧性。

2.2 烟丝柔韧性测量过程仿真模型分析

以表 2 所示烟丝柔韧性测量结果中最大值 (S_{\max}) 和最小值 (S_{\min}) 的两批次烟丝为研究对象, 建立烟丝柔韧性测量过程仿真模型, 仿真过程中烟丝生成比例按照实际测量结果设定。

2.2.1 仿真模型验证 烟丝尺寸配比及柔性的仿真模拟测量结果见表 4。为验证仿真模型的可靠性, 提取 S_{\max} 、 S_{\min} 及处于柔韧性均值附近的 \bar{S}_1 和 \bar{S}_2 这 4 组仿真模型与质构仪实际测量阶段的数据进行比对, 结果见图 3。

由表 4 可知, 通过质构仪与仿真模型测得的 4 个样品烟丝柔韧性相对误差均小于 5.00% 。相较于 S_{\max} 样品, S_{\min} 样品的 A1—A5、A8 烟丝比例即长

表 3 烟丝尺寸与柔性的相关性分析

Table 3 Correlation analysis between cut tobacco sizes and softness

指标	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
柔韧性数值	0.556 [*]	0.477 [*]	0.410 [*]	0.525 ^{**}	0.482 [*]	-0.718 ^{**}	-0.748 ^{**}	0.670 ^{**}

注: ** 表示极显著相关($P<0.01$); * 表示显著相关($P<0.05$)。

表 4 烟丝尺寸配比及柔韧性测量结果

Table 4 Ratios of cut tobacco size and corresponding softness measurement results

指标	S_{\max}	S_{\min}	\bar{S}_1	\bar{S}_2
A1	2.78	0.24	2.52	1.75
A2	3.79	3.65	4.11	3.99
烟丝占比例/%	8.97	6.82	6.94	7.93
A3	10.70	7.46	10.43	8.45
A4	12.71	10.54	13.22	12.75
A5	26.96	32.18	26.71	29.34
A6	29.81	35.37	32.42	32.80
A7	4.27	3.74	3.65	3.00
柔韧性实测值/($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$)	24.95	14.36	19.94	19.37
仿真模拟结果/($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$)	24.69	14.58	19.67	19.68
相对误差/%	1.04	1.53	1.35	1.60

丝率和碎丝率更低; A6、A7 烟丝比例即中丝率与短丝率更高, 柔韧性更佳。

由图 3 可知, 对于 4 个样品, 质构仪实测与仿真模拟计算的过程数据重合度高, 相对误差在 $\pm 5.00\%$ 内。使用两种方法测量烟丝柔韧性时, 当探头压板下边缘到达同一位置, 质构仪测得数据与模拟计算数据基本相符, 无明显差异。因此, 建立的仿真模型可靠, 采用上述模型及参数进行数值模拟计算并提取其中力学数据进行分析的方法基本可行。

2.2.2 不同尺寸烟丝平均压缩力 各尺寸烟丝所受平均压缩力随时间的变化曲线见图 4, 其中 A1—A8 分别表示对应尺寸烟丝所受平均压缩力。由图 4 可知, 在柔韧性测量过程中, 同时刻各尺寸单根烟丝所受平均压缩力随烟丝长度的降低而降低。5.00 mm 以上的 A1—A3 烟丝所受平均压缩力随时间变化的波动较大, 表明较长的烟丝在受力压缩过程中更易出现明显的局部错位、滑移, 出现压缩力突变现象; A4 和 A5 烟丝受力大小接近, 波动适中; 3.35 mm 以下的 A6—A8 烟丝受力随时间延长均匀增加。在柔韧性测量过程中, 烟丝受力随尺寸的下

降而变得更均匀。

2.2.3 灰色 T 型关联分析 根据仿真模拟过程数据, 利用式①—⑤进行计算, 得到探头压板感应力与各尺寸烟丝所受平均压缩力之间的灰色 T 型关联度如下: $r_1 = 0.251$, $r_2 = 0.651$, $r_3 = 0.681$, $r_4 = 0.653$, $r_5 = 0.721$, $r_6 = 0.747$, $r_7 = 0.712$, $r_8 = 0.543$ 。测量过程中, 各尺寸烟丝对探头压板感应力影响程度排序为: A6 > A5 > A7 > A3 > A4 > A2 > A8 > A1, 即 2.50 mm ~ 3.35 mm 烟丝对探头压板感应力影响最大, 10 mm 以上烟丝的影响最小。

2.2.4 径向力链随时间的演变机制 D. Barreto 等^[25] 提出了力链这一概念。在离散元系统中, 力链反映了颗粒受到接触时应力的传递路径^[26], 力链网络在外部载荷作用下的演变规律会影响物料的宏观力学性质。由于颗粒之间接触力大小不均匀, 通常以颗粒之间的平均接触力 (\bar{F}) 作为区别强接触与弱接触的界限^[27]。数个强接触连接形成强力链, 反之, 数个弱接触连接形成弱力链。提取 S_{\min} 和 S_{\max} 样品的柔韧性测量过程中烟丝间接接触力数据, 建立径向力链随时间的演变图像, 见图 5。由图 5 可知, 烟丝受压缩力作用时, 中高强度接触均首先出现在芯部, 随后向壁面接触位置发展。同时刻 S_{\min} 样品的中等及高强度力链数量更少, 中等强度力链分布更均匀。

2.2.5 烟丝尺寸对轴向力链的影响 为进一步探究各尺寸烟丝对烟丝柔性的影晌, 分别提取 22.5 s 时各尺寸烟丝及烟丝整体接触力数据, 建立轴向力链图像, 见图 6。由图 6 可知, A1 烟丝分布不均匀, 中高强度接触约占接触总量的 42%; A2 烟丝与烟丝整体之间存在明显的高强度力链; 对于 A3—A7 样品, 随着烟丝尺寸的降低, 各尺寸烟丝在堆料中分布更加均匀, 中低强度接触数量显著上升, 高强度接触数量则增加较慢。整体上, 中低强度接触的比例随烟丝尺寸降低而增加。这可能是由于尺寸较长烟丝的形状多变, 有明显弯曲、翻转

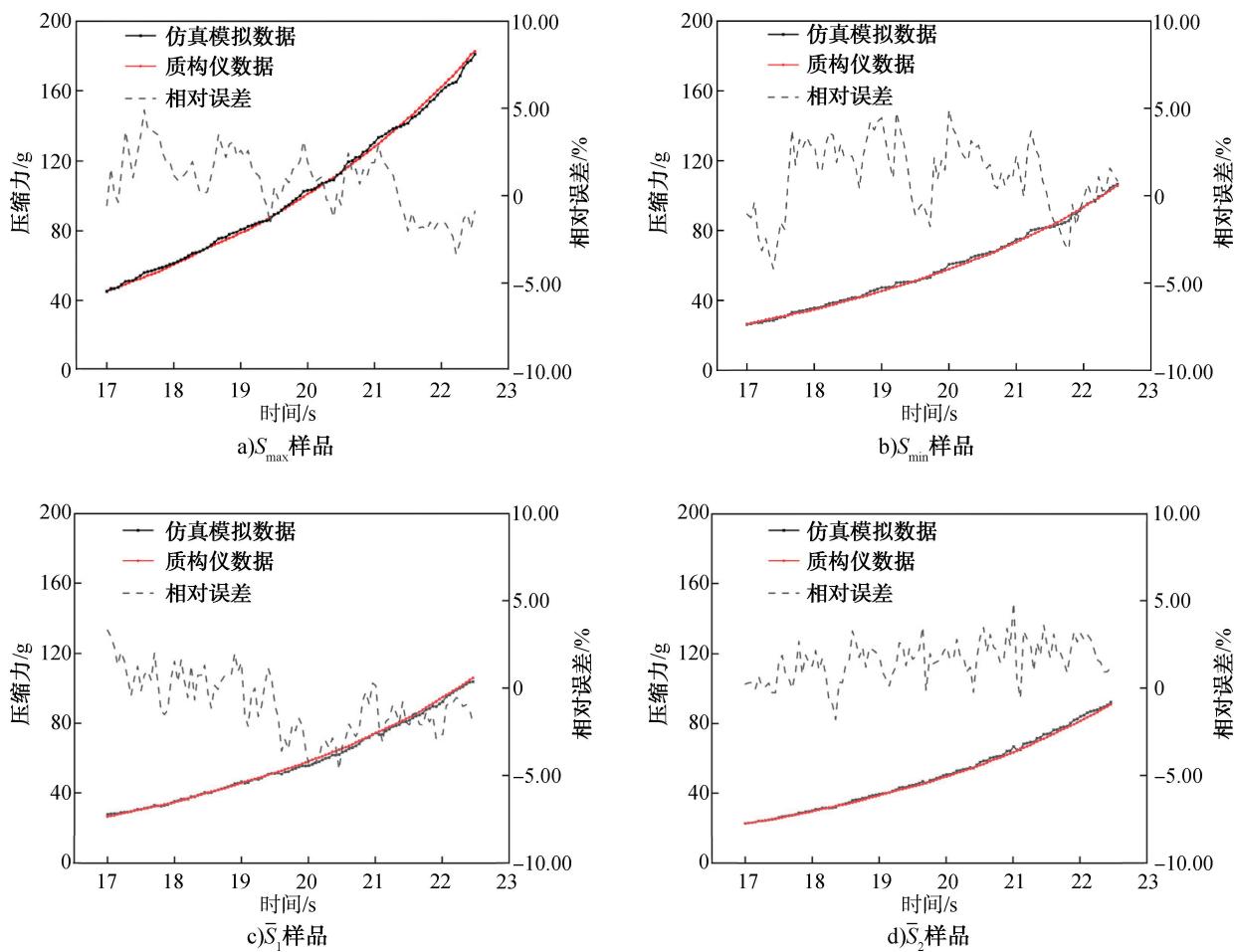


图3 不同样品的仿真模拟及质构仪测量结果对比图

Fig. 3 Comparison of simulation predictions and texture analyzer measurement results for different samples

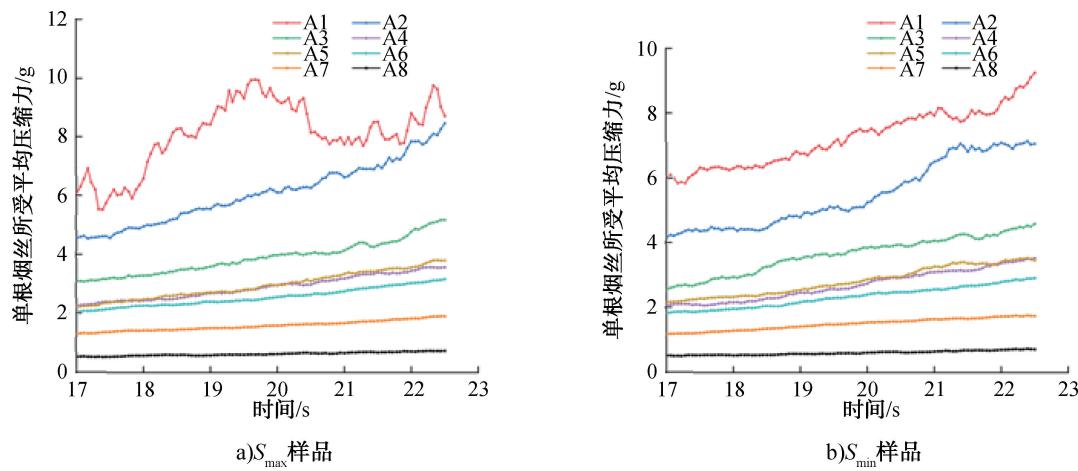


图4 各尺寸烟丝所受平均压缩力随时间的变化曲线

Fig. 4 Time-dependent curves of average compressive force on each cut tobacco size fraction during compression

的外形,占比增加时,在烟丝堆料内会使局部烟丝间均匀性变差,易出现“架拱”结构,进而在外部载荷作用下出现更多强接触。范林等^[28]认为,随着揉碎玉米秸秆长度的增加,秸秆之间相互缠绕且孔隙增多,均匀性变差,导致压缩时受力波动较大,本研究结果与其较一致。因此,降低长丝率和碎丝率、提高中丝率和短丝率可以减少烟丝在受压过程中的应力突变,使烟丝在外部载荷作用下受力更加均匀,力学性能更佳。

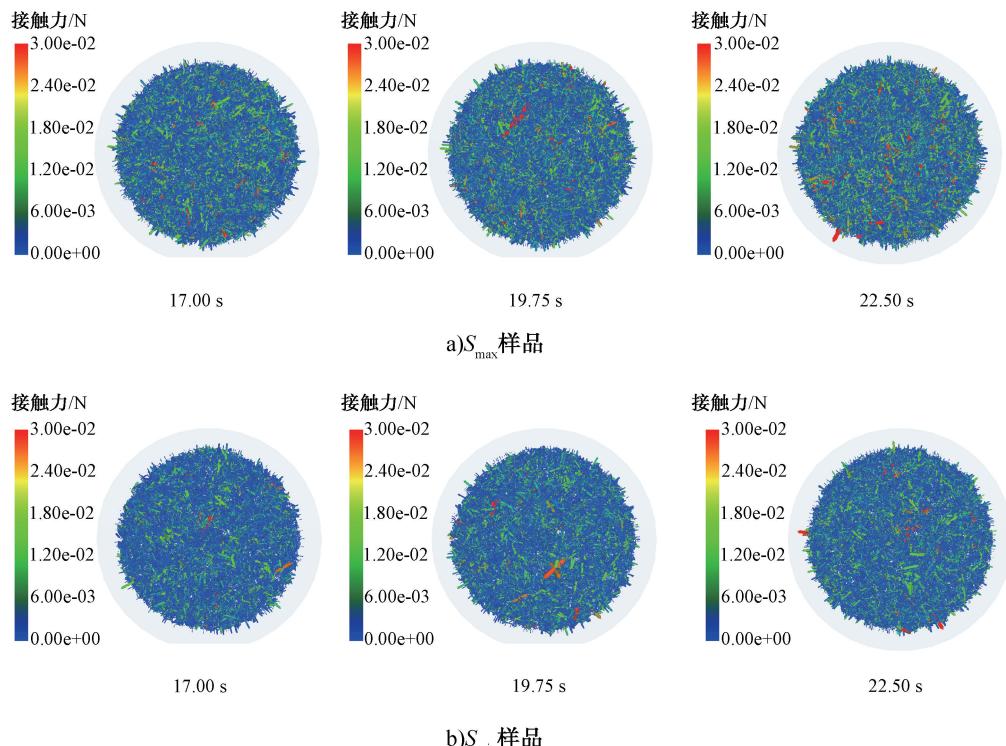
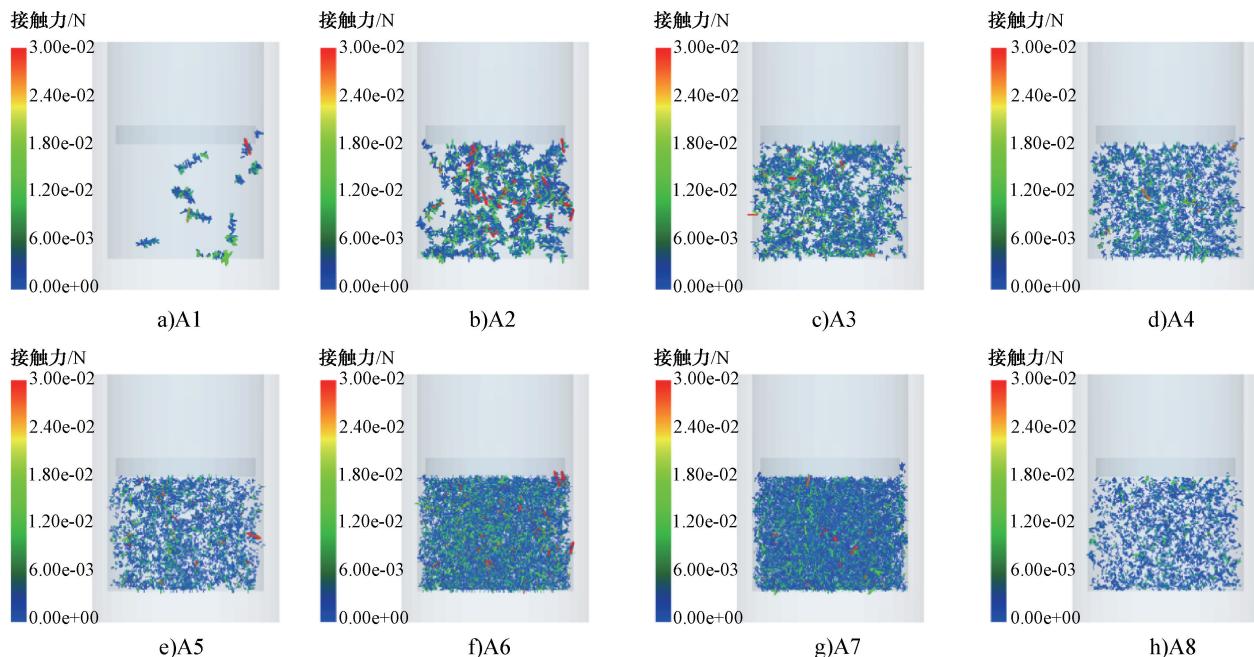
图 5 S_{\max} 和 S_{\min} 样品径向力链随时间的演变图Fig. 5 Radial force chain evolution in samples S_{\max} and S_{\min} during compression图 6 S_{\min} 样品轴向各尺寸烟丝力链对比图

Fig. 6 Axial force chain comparison for different size fractions

2.3 烟丝尺寸配比优化结果分析

在 S_{\min} 样品的基础上, 通过减少 A1—A5、A8 烟丝占比, 增加 A6、A7 烟丝占比, 即采用控制长丝率、

降低碎丝率、提高中丝率和短丝率的方法进一步优化烟丝尺寸配比, 人为掺配出 3 种不同配比的烟丝样品, 其柔软性见表 5。由表 5 可知, 随着 A6、A7 烟

丝占比增加,烟丝柔韧性数值先下降后上升。烟丝柔韧性在合理提升中丝率和短丝率时明显改善,继续提升则开始下降。这可能是由中丝和短丝占比过高、烟丝填充值过低、堆积过于紧密、在柔韧性测量过程中随着探头下压被迅速压实导致的。这说明合理提高中丝率和短丝率、降低长丝率和碎丝率有利于改善烟丝柔韧性。

表5 不同尺寸配比烟丝样品的柔韧性

Table 5 Softness measurements for cut tobacco samples with varying size ratios and compositions

指标	样品 1	样品 2	样品 3
A1	0	0	0
A2	3	2	1
烟丝占比 /%	6	4	2
A4	7	5	3
A5	9	6	3
A6	34	38	43
A7	38	44	48
A8	3	2	0
烟丝柔韧性 / ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$)	14.02	12.79	26.25

3 结论

本研究借助离散元法构建质构仪仿真模型,对烟丝柔韧性进行测量,并分析各尺寸烟丝在测量过程中受力差异和对力链演变的影响,得到如下结论:3.35 mm 以上、1.00 mm 以下烟丝占比与柔韧性数值之间呈显著正相关;1.00~2.50 mm 和 2.50~3.35 mm 烟丝占比与柔韧性数值之间呈显著负相关。在受力压缩时,2.50~3.35 mm 烟丝对探头感知应力的影响程度最大。适当提高 1.00~3.35 mm 烟丝占比、降低 3.35 mm 以上及 1.00 mm 以下烟丝占比后,在外部载荷作用下,烟丝之间中高强度接触数量降低且分布更加均匀,应力突变减少,力学性能得到明显改善,烟丝柔韧性提升。因此适当降低长丝率和碎丝率、提高中丝率和短丝率有利于改善烟丝的柔韧性。未来可进一步精确长、中、短、碎丝率的占比,以进一步提高烟丝的适用性。

参考文献:

[1] 于建军.卷烟工艺学[M].2 版.北京:中国农业出版

社,2009.

- [2] 李永宽,杨耀伟,冯剑,等.提高烟丝适用性的综合质量评价方法[J].河南化工,2013,30(S1):14~17.
- [3] 纪晓楠,张玉海,许玉江,等.烟丝刚柔度测量方法及装置:CN112985995A[P].2021-06-18.
- [4] 付秋娟,孙婷婷,窦玉青,等.初烤烟叶柔韧性及其与烟叶主要理化指标的关系[J].烟草科技,2021,54(5):77~81.
- [5] 陈天才,耿红梅,王振国,等.基于偏最小二乘回归的挂灰程度和柔韧性对烟叶质量的影响分析[J].安徽农业科学,2023,51(6):177~181.
- [6] 沈进,宋成剑,胡梦岩.基于质构仪的造纸法再造烟叶柔韧性评价方法[J].烟草科技,2020,53(7):87~91.
- [7] 李晓,贺紫玺,方世航,等.烟丝柔韧性的检测及其与卷制质量的关系[J].云南农业大学学报(自然科学),2023,38(2):314~323.
- [8] 李博宇,范兴,乔俊峰,等.数值模拟在烟草领域中的应用与展望[J].烟草科技,2022,55(4):89~100.
- [9] BOAC J M, KINGSLEY AMBROSE R P, CASADA M E, et al. Applications of discrete element method in modeling of grain postharvest operations [J]. Food Engineering Reviews, 2014, 6(4):128~149.
- [10] 袁晓明,王超,阎鹏,等.离散元法在工农业上的应用研究综述[J].机械设计,2016,33(9):1~9.
- [11] 吴玉生,王道铨,李鹏超.基于离散元法的烟丝加香机优化设计[J].烟草科技,2021,54(12):87~94.
- [12] 汤达伟,方鑫,杨格,等.离散元法在卷烟包装机组烟库仿真设计中的应用[J].烟草科技,2020,53(9):94~99.
- [13] 朱立平,袁竹林,闫亚明,等.基于离散单元法的丝状颗粒传热数学模型[J].化工学报,2012,63(7):2051~2058.
- [14] 陈有锦.滚筒式烟草加料机加料过程分析及参数优化研究[D].昆明:昆明理工大学,2023.
- [15] 张秀丽,吴亚文,李建华,等.烟草颗粒肥配比混施装置的设计与试验[J].河南农业大学学报,2020,54(5):829~835.
- [16] 郑文鑫,林恒矗,何金成,等.烟草除秆清根刀具作业过程离散元仿真分析[J].福建农林大学学报(自然科学版),2023,52(4):563~572.
- [17] 国家烟草专卖局.卷烟配方烟丝结构的测定:YC/T 289—2009[S].
- [18] 杜海君,雷霆,张永安,等.首蓿振动压缩成型过程中的力链演变[J].农业工程学报,2022,38(2):33~40.
- [19] THAKUR S C, MORRISSEY J P, SUN J, et al. Micromechanical analysis of cohesive granular materials using the discrete element method with an adhesive elasto-plastic contact model[J]. Granular Matter, 2014, 16(3):383~400.
- [20] GENG F, LI Y M, WANG X Y, et al. Simulation of dynamic processes on flexible filamentous particles in the transverse section of a rotary dryer and its comparison with

- ideo-imaging experiments [J]. Powder Technology, 2011, 207(1/2/3): 175-182.
- [21] 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.
- [22] 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].
- [23] 孙玉刚, 党耀国. 灰色 T 型关联度的改进 [J]. 系统工程理论与实践, 2008, 28(4): 135-139.
- [24] 李孟霞, 李军营, 文国松, 等. 影响云南清香型烟叶化学品质的土壤因子分析 [J]. 西南农业学报, 2021, 34(2): 340-346.
- [25] BARRETO D, O' SULLIVAN C. The influence of inter-particle friction and the intermediate stress ratio on soil response under generalised stress conditions [J]. Granular Matter, 2012, 14(4): 505-521.
- [26] 孙其诚, 金峰, 王光谦, 等. 二维颗粒体系单轴压缩形成的力链结构 [J]. 物理学报, 2010, 59(1): 30-37.
- [27] CAVARRETTA I, O' SULLIVAN C. The mechanics of rigid irregular particles subject to uniaxial compression [J]. Géotechnique, 2012, 62(8): 681-692.
- [28] 范林, 王春光, 王洪波, 等. 揉碎玉米秸秆可压缩性研究 [J]. 农业机械学报, 2008, 39(11): 76-80.

Mechanical effects of cut tobacco sizes on softness characterized by discrete element method

LI Xiao¹, FENG Dongmin¹, GUO Pengwei², FANG Shihang³, LI Yixin¹, LU Ke¹, JI Xiaonan⁴

1. College of Tobacco Science and Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;
2. Technology Center, Jilin China Tobacco Industry Co., Ltd., Changchun 130033, China;
3. Nanyang Cigarette Factory, China Tobacco Henan Industrial Co., Ltd., Nanyang 473000, China;
4. Technology Center, Henan China Tobacco Industry Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China

Abstract: To investigate the effects of cut tobacco size distribution on softness and elucidate the underlying mechanisms causing variations in softness, a texture analyzer simulation model was developed using the discrete element method (DEM). This model was employed to measure cut tobacco softness, analyze the force response differences among various size fractions during testing, and explore their impacts on force chain evolution. By adjusting the size ratios, the variation patterns of softness were systematically examined. The results indicated that a higher proportion of tobacco particles exceeding 3.35 mm or below 1.00 mm was associated with reduced softness, while an increased proportion of tobacco within the size ranges of 1.00~2.50 mm and 2.50~3.35 mm correlated with improved softness. Tobacco particles in the 2.50~3.35 mm size range exerted the greatest influence on the force response during measurement. The average force experienced by tobacco particles decreased with decreasing particle size and became more uniformly distributed. Softer tobacco samples exhibited fewer medium-and high-strength force chains, which were also more uniformly distributed. The proportion of low-to-medium strength contacts between different size fractions increased with decreasing particle size. Rational increases in medium-sized (1.00~2.50 mm) and short (2.50~3.35 mm) tobacco fractions improved softness, while excessive proportions of long (>3.35 mm) and fine (<1.00 mm) particles degraded softness. Optimizing the size distribution by increasing the proportion of 1.00~3.35 mm particles and reducing fractions outside this range enhanced both the mechanical performance and softness under external loading.

Key words: distinct element method; ratio optimization; cut tobacco size; cut tobacco softness; mechanical performance

[责任编辑:王晓波 刘春奎]