

制造技术

李晓, 李劲锋, 郭朋玮, 等. 烟丝回弹特性检测方法的建立及参数优化[J]. 中国烟草学报, 2023,29(2). LI Xiao, LI Jinfeng, GUO Pengwei, et al. Establishment and parameter optimization of a method for detecting springback characteristics of cut tobacco[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2023,29(2). doi:10.16472/j.chinatobacco. 2022.T0161

烟丝回弹特性检测方法的建立及参数优化

李晓¹, 李劲锋¹, 郭朋玮¹, 贺紫玺¹, 魏旭鹤¹, 孙觅², 王浩宇², 纪晓楠^{2*}

1 郑州轻工业大学食品与生物工程学院, 郑州高新技术产业开发区科学大道 136 号 450001;

2 河南中烟工业有限责任公司技术中心, 郑州市经开第三大街 8 号 450000

摘要:【目的】解决烟丝填充值、弹性等物理指标不能全面真实反映卷制时烟丝回弹对卷烟质量影响的问题。【方法】建立了一套烟丝回弹特性检测方法并运用质构仪进行检测, 对该方法进行重复性、差异性验证, 通过单因素及响应面优化确定最佳测试参数, 探究不同烟丝结构对回弹特性的影响。【结果】(1) 通过分析烟丝卷制过程烟丝压缩及回弹过程, 将烟丝回弹特性 P 定义为烟丝束受压后回弹至固定直径时的能力。(2) 质构仪测定烟丝回弹特性的最佳条件: 探头型号为 A/BE-d45 圆板探头, 测前速度 12 mm/s, 测中速度 6 mm/s, 触发力 4 g, 回弹速度 1 mm/s, 压缩时间 3 s, 回弹保持时间 16 s。该方法的日内和日间精密度分别小于 4.20% 和 2.93%。(3) 烟丝回弹特性受烟丝结构影响, 烟丝尺寸越长, 烟丝回弹特性越大。【结论】该表征方法科学可行且精密度较好, 可对烟丝回弹特性进行准确测量。适宜的烟丝结构可保证烟丝的回弹能力, 保持烟支的填充的饱满度, 提高产品质量。**关键词:** 烟丝; 质构仪; 回弹特性; 响应面; 烟丝结构

卷烟机烟枪处的烟条成型工艺是烟丝条在烟枪成型通道内逐步压缩成型, 最后定型为符合烟支规格的烟条的过程^[1], 其间经过烟舌、小压板、大压板的 3 次压缩, 并伴随有 3 次回弹^[2]。烟丝经压缩后回弹至成品烟支直径的能力即烟丝回弹特性, 决定了烟支填充的饱满程度, 回弹特性强的烟丝在烟条中的支撑能力强, 不易滑移和脱落, 更有利于烟支空头、端部落丝量等物理质量的控制。

目前行业内通常采用烟丝填充值、弹性等物理指标表征烟丝的填充能力。烟丝填充值^[3]、弹性^[4]与烟丝回弹特性同属于力学范畴, 弹性是反映烟丝物理加工性能优劣的参数之一^[5-7], 烟丝填充值对成品卷烟的理化指标^[8]、感官质量^[9]、烟丝消耗^[10]有很大影响。弹性是烟丝受压后完全释压自由回弹的过程, 反映出烟丝受压后恢复受压前能力大小, 烟丝卷制过程的回弹是在卷烟纸包裹下的非完全释压回弹。烟丝填充值是以一定时间一定压力作用下, 单位质量烟丝所占的容积表征, 没有回弹过程参与。且卷制过程中烟丝是相对

动态的, 烟丝束膨胀至固定直径时所产生的回弹力直接反映了卷烟纸承受的力, 卷烟纸承受力越大, 烟丝对卷烟纸的支撑力越强, 卷烟越饱满。填充值、弹性并不能准确反映这种动态特性。

质构仪能够根据样品的物性特点做出数据化的准确表述, 是一种精确的感官量化测量仪器^[11]。随着卷烟加工工艺水平提高, 相关技术人员尝试运用质构仪来测定烟叶及再造烟叶的力学性能, 如脆性、柔软性、黏附力^[12-15]等, 但目前烟丝回弹特性的表征或评价方法, 行业内还没有统一标准。因此, 运用质构仪模拟卷制过程中烟枪处对烟丝先压缩后回弹的过程, 建立烟丝回弹特性检测方法, 并对结果重复性进行验证。以期对烟丝回弹特性进行快速、准确测量, 对提高烟支卷制过程中烟支质量稳定性具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

A 牌号纯叶丝; B、C、D、E 四牌号成品烟丝;

基金项目: 河南中烟工业有限责任公司重点项目“烟丝柔软性的检测与应用研究”(AW201911)

作者简介: 李晓 (1966—), 硕士, 教授, 主要从事卷烟加工技术研究, Tel: 13838065906, Email: 519389150@qq.com

通讯作者: 纪晓楠 (1988—), 硕士, 工程师, 主要从事烟草加工工艺研究, Tel: 13525534064, Email: hnzy_jxn@163.com

收稿日期: 2022-07-06; 网络出版日期: 2023-03-07

均由河南中烟工业有限责任公司提供。

TA.XT- plus 质构仪 (感应元 30 kg), 英国 Stable Micro Systems 公司产; KBF 型恒温恒湿箱, 德国 Binder 公司产。PL203 电子天平 (感重 0.001 g, 梅特勒-托利多仪器上海有限公司); YQ-2 型烟丝分选筛 (郑州嘉德机电科技有限公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 烟丝样品的制备

样品制备: 将分好的烟丝贴好标签后放置在温度 25℃, 相对湿度 60% 的恒温恒湿箱中平衡 48 h 备用。采用四分法取样。

1.2.2 检测元件

检测元件信息如表 1 所示。

表 1 检测元件相关信息表
Tab.1 Relevant information of detection elements

| 序号 | 类别 | 材质 | 型号 |
|----|-----|-------|--|
| 1 | 质构仪 | / | TA. XT PlusC |
| 2 | 感应元 | / | 30 kg |
| 3 | 探头 | 铝+亚克力 | A/BE-d45 圆形压板, 直径 45 mm |
| 4 | 样品杯 | 亚克力 | 内径 50 mm, 外径 60 mm 外形尺寸: 150 mm×75 mm 长方形 |
| 5 | 载物台 | 亚克力 | 固定台: 直径 60 mm 圆形, 深度 0.5 mm |

表 2 单因素试验设计表
Tab.2 Single factor test design table

| 试验水平 | 试验因素 | | | | | |
|------|-----------------|-------|-----------------|--------|-----------------|----------|
| | 测前速度/ (mm/s) | 触发力/g | 测中速度/ (mm/s) | 压缩时间/s | 回弹速度/ (mm/s) | 回弹保持时间/s |
| 1 | 1 | 1 | 0.5 | 0.5 | 1 | 7 |
| 2 | 5 | 2 | 2 | 1 | 3 | 9 |
| 3 | 10 | 3 | 4 | 2 | 5 | 11 |
| 4 | 15 | 4 | 6 | 3 | 7 | 13 |
| 5 | 20 | 5 | 8 | 5 | 9 | 15 |
| 6 | | | 10 | 10 | | 17 |
| 7 | | | | 15 | | 19 |

1.2.5 中心组合实验设计

在单因素实验的基础上采用 Box-Behnken 法^[16]设计实验, 由单因素实验可得测前速度、压缩时间和回弹保持时间对烟丝回弹特性的影响较大, 为进一步验证测前速度、压缩时间和回弹保持时间对烟丝回弹特性的影响, 采用测前速度 (A1)、压缩时间 (A2)、回弹保持时间 (A3) 进行中心组合设计优化实验, 以 P 作为响应值, 采用三因素三水平的响应分析法进行设计, 响应曲面因素水平见表 3。

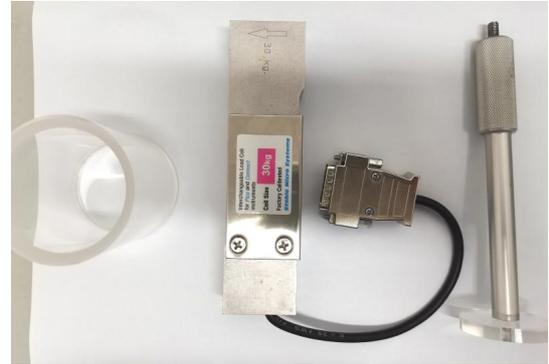


图 1 检测元件图示
Fig.1 Detecting elements

1.2.3 回弹特性表征方法的建立

分析烟丝在卷烟机卷制时进入烟枪前后的压缩和回弹过程, 筛选代表性力学指标, 建立烟丝回弹特性表征方法。采用质构仪模拟烟丝受压及回弹过程, 实现烟丝回弹特性的定量检测。

1.2.4 表征方法中质构仪参数的单因素实验

根据建立的烟丝回弹特性检测方法, 采用单因素试验法, 优化测前速度、触发力、测中速度、压缩时间、回弹速度、回弹保持时间等检测参数, 试验过程固定探头测后速度 10 mm/s, 单因素试验因素水平见表 2。

表 3 实验因素与水平
Tab.3 Experimental factors and levels

| 水平 | 因素 | | |
|----|---|-------------------------|---------------------------|
| | A ₁ : 测前速度/ (mm · s ⁻¹) | A ₂ : 压缩时间/s | A ₃ : 回弹保持时间/g |
| -1 | 8 | 1 | 13 |
| 0 | 10 | 2 | 15 |
| 1 | 12 | 3 | 17 |

1.2.6 回弹特性表征方法的精密度验证

安排 3 名操作人员, 使用同一台实验仪器, 分别在 3 天内不同时间点对同一样品重复检测 5 次, 测得日内精密度、日间精密度, 考察方法可靠性。

2 结果

2.1 回弹特性表征方法的建立

2.1.1 方法建立

烟丝束在烟条成型时由布袋包裹穿过烟枪, 在烟枪出口前收缩至近圆形, 烟丝处于压缩状态 (烟丝密度 ρ_1), 检测该状态时的烟丝对外的反向作用力 (F_1); 烟条冲出大压板通道出口时, 压力解除, 烟条开始发生回胀, 经电烙铁定型后直径与成品烟条直径相等, 此时为烟丝回弹状态 (烟丝密度 ρ_2), 检测该状态时的烟丝对外的反向作用力 (F_2)。因此, 定义烟丝束受压后回弹至固定直径时的能力为烟丝的回弹特性, 即回弹特性 (P) = (F_2/F_1) $\times 100\%$ 。

采用质构仪, 模拟烟丝的密度变化状态, 检测过程探头应力变化, 记录回弹特性力学特征曲线 (如图 2 所示)。横坐标为实验时间, 纵坐标为实验过程中探头感应到的力, 最大峰值为将烟丝压缩至压缩高度时探头瞬时感应到的力, F_1 为将烟丝压缩至压缩高度后探头稳定时感应到的力, F_2 为烟丝回弹至回弹高度后探头稳定时感应到的力。具体过程为: 选用圆板探头, 按照测前速度 (V_1) 对将探头下移, 当探头应力达到触发力阈值后, 按照测中速度 (V_2) 将烟丝压缩至密度 ρ_1 , 保持一定的压缩时间 T_1 , 记录达到稳定时的探头应力 F_1 ; 按照测后速度 (V_3) 将烟丝回弹至密度 ρ_2 , 保持一定的回弹时间 T_2 , 记录达到稳定时的探头应力 F_2 。

当检测样品量一定、检测样品杯体积一定时, 压缩密度 ρ_1 和回弹密度 ρ_2 可转化为烟丝压缩前后的高度 H_1 和 H_2 。

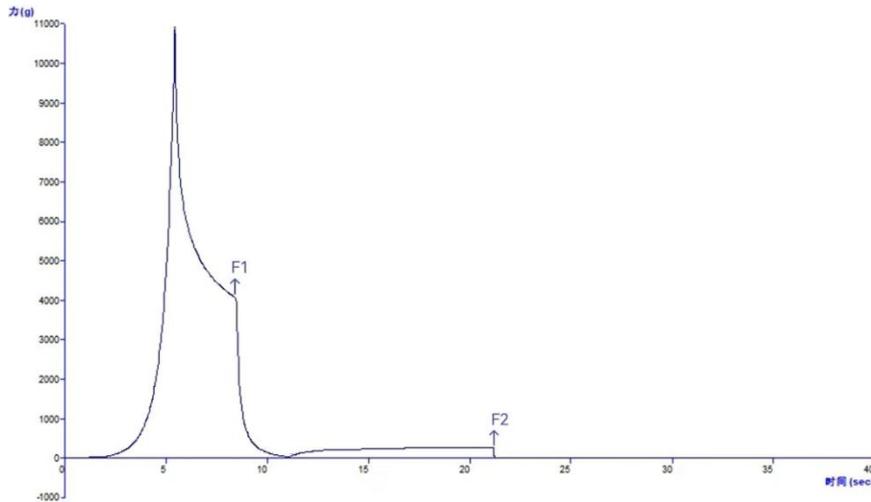


图 2 烟丝回弹特性力学特征曲线示意图

Fig.2 Schematic diagram of mechanical curve of cut tobacco springback characteristics

2.1.2 压缩高度(H_1)和回弹高度(H_2)的确定

质构仪模拟检测过程烟丝的压缩高度(H_1)和回弹高度(H_2)可由以下过程计算得出:

(1) 单位长度烟条烟丝重量:

$$M_1 = \rho_2 \times V_1 = \rho_2 \times \pi \times \left(\frac{d_1}{2}\right)^2 \times L \quad (1)$$

式中 ρ_2 为回弹后烟丝密度 (mg/cm^3), V_1 为单位长度烟条体积 (mm^3), d_1 为烟支直径 (mm), L 为烟支单位长度 (mm)。

(2) 压缩状态烟支的直径近似为烟支直径减去上下布袋的厚度, 即压缩后烟支直径:

$$d_2 \approx d_1 - 2 \times t \quad (2)$$

式中 t 为布袋的厚度 (mm)。

(3) 压缩状态烟丝密度:

$$\rho_1 = \frac{M_1}{M_2} = \frac{\rho_2 \times \pi \times \left(\frac{d_1}{2}\right)^2 \times L}{\pi \times \left(\frac{d_1 - 2 \times t}{2}\right)^2 \times L} = \rho_2 \times \left(\frac{d_1}{d_1 - 2 \times t}\right)^2 \quad (3)$$

式中 ρ_1 为压缩时烟丝密度 (mg/cm^3), V_2 为压缩后烟条体积 (mm^3)。

(4) 由于质构仪模拟检测部件为圆柱状杯体, 根据 $\rho = M/V$, $V = \pi r^2 H$ 可以得出模拟检测过程烟丝压缩前后的高度:

$$H_1 = \frac{M_2}{\pi r^2 \times \rho_1} \quad (4)$$

$$H_2 = \frac{M_2}{\pi r^2 \times \rho_2} \quad (5)$$

式中 H_1 为压缩高度 (mm), H_2 为回弹高度 (mm), M_2 为检测样品重量 (g), r 为检测样品杯半径 (mm^3).

(5) 根据行业标准^[17], 以常规卷烟为参考, 卷烟圆周 24.3 mm, 烟支直径 (d_1) 为 7.74 mm, 烟支烟丝密度 (ρ_2) 235 mg/cm^3 , 布袋厚度 (t) 0.5 mm, 检测样品量 (M_2) 为 5 g, 检测样品杯内径 (r) 50 mm, 可以得出质构仪模拟检测过程关键参数见表 4。当由于烟丝的结构如梗丝、膨丝、加入比例不同, 导致烟支烟丝密度 (ρ_2) 有显著性变化时, 可测出此时烟支烟丝密度 (ρ_2)^[18]代入式 1~式 5 计算出相应关键参数。

表 4 质构仪模拟检测关键过程参数

Tab.4 Simulation and detection of key process parameters by texture analyzer

| 指标 | 压缩状态 | 回弹状态 |
|-----------------------------------|--------------------|------------------|
| 检测样品重量/g | 5 | 5 |
| 烟丝密度/ (mg/cm^3) | 309.9 (ρ_1) | 235 (ρ_2) |
| 烟丝高度/mm | 82 (H_1) | 109 (H_2) |

2.2 质构仪参数的选择

2.2.1 探头选择

质构仪测试探头有锥形、柱形、针形、球形、盘形探头等, 根据样品特性选择不同的测试探头^[19]。为实现烟丝的均匀压缩, 探头需要与烟丝的顶部实现最大面积的充分接触, 同时要保证探头各个部位与烟丝接触的力基本一致, 锥形、针形、柱形探头直径较小, 均为某一点的力值, 结果不具备代表性, 球形各个部位与烟丝接触的力差异较大, 无法实现均匀压缩。圆形压板探头能够实现最大面积的接触和均匀压缩, 因此, 借鉴烟丝填充值测定仪探头设计, 最终选取 A/BE-d45 圆板探头。在满足检测载荷情况下选择较小感应元, 提高检测精度。本论文研究根据实验检测载荷需求, 选择 30 kg 感应元, 选用压缩模式。

2.2.2 探头测前速度

探头测前速度对烟丝回弹特性测定结果的影响见图 3。由图可知, 随着测前速度增加, 烟丝回弹特性呈现先增大后减小的趋势, 变异系数呈现先减小后增加的趋势。当测前速度为 $10.0 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 变异系数最小为 3.36%。为避免测前速度与测中速度相差较大而

导致设定的测中速度与实际值不符, 测前速度设定值不宜太大。同时从缩短测试时间角度来看, 在保证测定结果较为稳定的前提下, 测前速度越大, 测试时间就越短。综合考虑, 选择测前速度为 $10.0 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

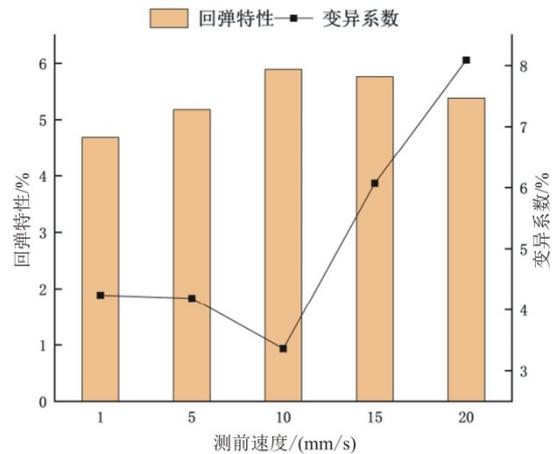


图 3 测前速度对烟丝回弹特性测定结果的影响

Fig.3 Effect of pre measurement speed on the measurement results of cut tobacco springback characteristics

2.2.3 触发力

触发力对烟丝回弹特性影响如图 4 所示。可知, 触发力对烟丝回弹特性影响较小, 随触发力的改变烟丝回弹特性的数值基本不变。测试过程中, 当触发力为 1 g 时烟丝回弹特性的变异系数最大, 可能是由于烟丝表面相对不平整, 所测回弹特性不稳定。测试过程中触发力设置较小, 不适于测定烟丝的回弹特性。在触发力为 4 g 时, 变异系数最小, 为 2.29%。因此, 触发力选择 4 g。

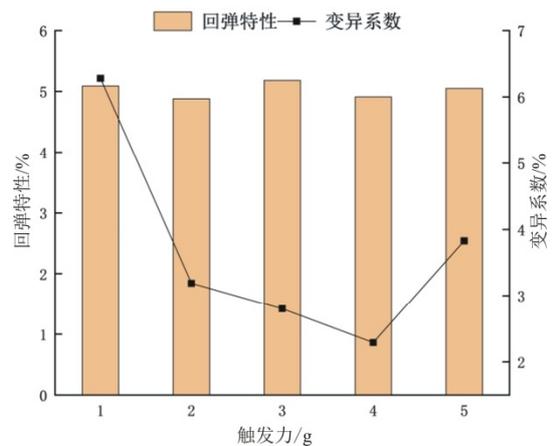


图 4 触发力对烟丝回弹特性测定结果的影响

Fig.4 Effect of trigger force on the measurement results of cut tobacco springback characteristics

2.2.4 探头测中速度

探头测中速度对烟丝回弹特性的影响如图 5 所示。可知，测中速度对烟丝回弹特性的影响较小，随着测中速度的增大，回弹特性基本保持不变。回弹特性的变异系数先减少后增大。测中速度 $4 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ， $6 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时回弹特性变异系数接近，分别为 3.46% 和 3.15%。从缩短测试时间角度来看，测中速度越大，测试时间就越短。综合考虑，选择测中速度为 $6 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

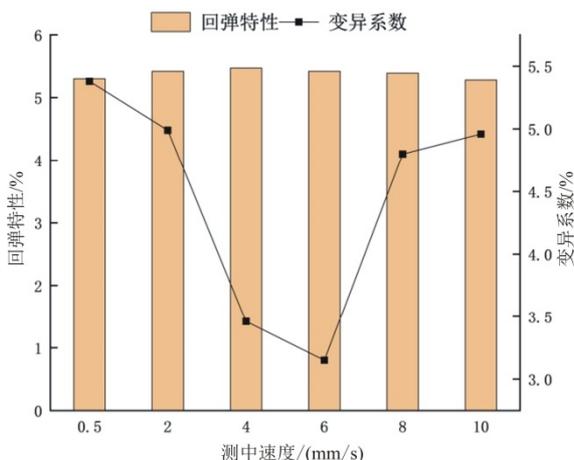


图 5 测中速度对烟丝回弹特性测定结果的影响

Fig.5 Effect of speed during measurement on the measurement results of cut tobacco springback characteristics

2.2.5 探头压缩时间

探头压缩时间对烟丝回弹特性的影响如图 6 所示。探头压缩时间对烟丝回弹特性影响较大。

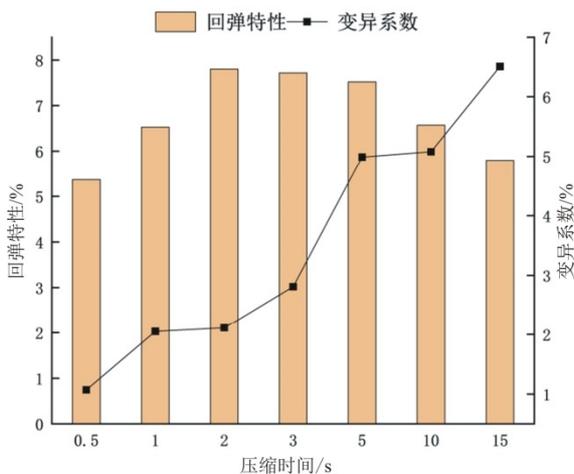


图 6 压缩时间对烟丝回弹特性测定结果的影响

Fig.6 Effect of compression time on the measurement results of springback characteristics of cut tobacco

当探头压缩时间小于 10 s 时，烟丝回弹特性逐渐

增大后趋于稳定。当探头压缩时间大于 10 s 时，回弹特性开始降低，可能是由于探头压缩时间过长从而导致烟丝结构被破坏。探头压缩时间对回弹特性测试结果的变异系数影响较大，随着探头压缩时间的增大，所测烟丝回弹特性的变异系数也逐渐增大。当探头压缩时间为 0.5 s 和 1 s 时，压缩时间过短，烟丝未被充分压缩，回弹特性数值变化较大，结果不具备代表性。2 s、3 s、5 s 时烟丝回弹特性基本保持稳定，变异系数呈现增大趋势，为保持结果稳定且缩短实验时间，探头压缩时间选为 2 s。

2.2.6 探头回弹速度

探头回弹速度对烟丝回弹特性的影响如图 7 所示。随着探头回弹速度的增加，烟丝回弹特性的数值基本保持不变，表明探头回弹速度对烟丝回弹特性的影响较小。测试过程中回弹特性的变异系数随着探头回弹速度的增大先增大后减小，为避免由于探头回弹过快而导致烟丝自身回弹速度无法跟上探头回弹速度，从而影响检测结果，回弹速度应尽量选择较小数值。在回弹速度为 $7 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，变异系数最大，为 8.66%。在回弹速度为 $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，变异系数最小，为 2.13%。因此，回弹速度选择 $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

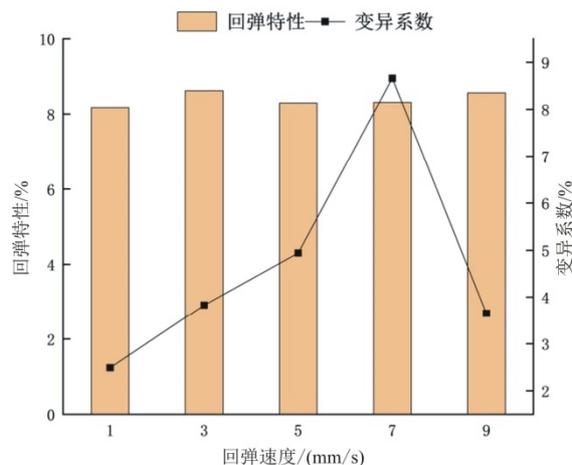


图 7 回弹速度对烟丝回弹特性测定结果的影响

Fig.7 Effect of springback speed on the measurement results of cut tobacco springback characteristics

2.2.7 探头回弹保持时间

探头回弹保持时间对烟丝回弹特性的影响见图 8。随着探头回弹保持时间的增加，烟丝回弹特性呈现先增大后稳定趋势。随着回弹保持时间的变化烟丝回弹特性变化幅度较大，表明探头回弹保持时间对烟丝回弹特性的影响较大。

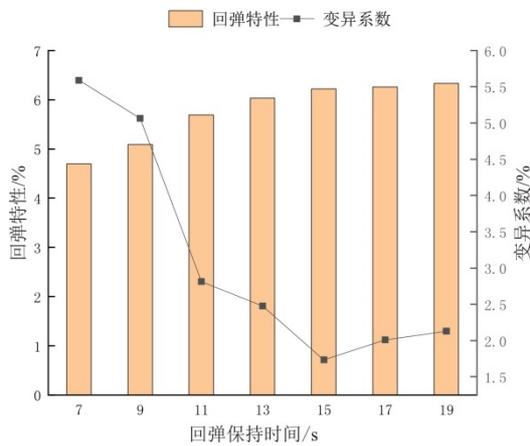


图 8 回弹保持时间对烟丝回弹特性测定结果的影响

Fig.8 Effect of springback holding time on the measurement results of springback characteristics of cut tobacco

随着探头回弹保持时间的增加, 回弹特性变异系

数先减小后趋于稳定, 表明随着探头回弹时间的增加, 测定过程中烟丝回弹特性的波动逐渐减小。可能是由于回弹保持时间过短, 量筒内烟丝没有完全恢复, 随着回弹保持时间增加量筒内烟丝状态趋于稳定。在探头回弹保持时间为 7 s 时测试过程中烟丝回弹特性的变异系数最大, 在探头回弹保持时间为 15 s 时变异系数最小为 1.73%。其中 15 s、17 s 和 19 s 时烟丝回弹特性数值较为接近, 为缩短实验时间, 同时保证测试结果稳定性, 探头回弹保持时间应选择 15 s。

2.3 响应面优化结果

2.3.1 响应面实验设计及结果

采用 DesignExpert 10 软件对测试条件进行最优化实验设计, 响应面实验结果如表 5 所示。

表 5 中心组和设计方案及测定结果

Tab.5 Central group design scheme and measurement results

| 序号 | 测前速度/(mm·s ⁻¹) | 压缩时间/s | 回弹保持时间/s | 回弹特性 (P) /% |
|----|----------------------------|--------|----------|-------------|
| 1 | 8 | 1 | 15 | 6.41 |
| 2 | 12 | 1 | 15 | 6.68 |
| 3 | 8 | 3 | 15 | 8.31 |
| 4 | 12 | 3 | 15 | 7.83 |
| 5 | 8 | 2 | 13 | 7.47 |
| 6 | 12 | 2 | 13 | 7.19 |
| 7 | 8 | 2 | 17 | 7.71 |
| 8 | 12 | 2 | 17 | 7.53 |
| 9 | 10 | 1 | 13 | 6.58 |
| 10 | 10 | 3 | 13 | 7.78 |
| 11 | 10 | 1 | 17 | 6.78 |
| 12 | 10 | 3 | 17 | 8.14 |
| 13 | 10 | 2 | 15 | 7.96 |
| 14 | 10 | 2 | 15 | 7.83 |
| 15 | 10 | 2 | 15 | 7.82 |
| 16 | 10 | 2 | 15 | 7.72 |
| 17 | 10 | 2 | 15 | 7.63 |

2.3.2 模型建立与显著性检验

对表 5 中的实验数据采用 DesignExpert 10 软件进行多元回归拟合, 回归方程 $Y=7.792-0.08375A+0.70125B+0.1425C-0.1875AB+0.025AC+0.040BC-0.16475A^2-0.31975B^2-0.15225C^2$ 。根据表 6, 得到剔除不显著项后回归方程 $Y=7.792+0.70125B+0.1425C-0.1875AB-0.16475A^2-0.31975B^2-0.15225C^2$ 。优化后回归模型 $P<0.0001$, 说明烟丝回弹特性与各因素关系显著, 该模型可信度高, 失拟项 $P=0.5484$ 不显著 ($P>0.05$), 说明拟合度好。模型的决定系数 $R^2=0.9805$, 校正决定

系数 $R^2_{adj}=0.9554$, 变异系数 $CV=1.59\%$, 说明因变量与自变量之间线性关系显著, 烟丝回弹特性大小的变化有 95.54% 来源于测前速度、压缩时间和回弹保持时间。该模型较稳定且误差小, 适用于各参数在一定范围内响应值的预测。其中该回归模型中因素 B、C, 交互项 AB, 二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 的 P 值 <0.05 , 对因变量有显著影响。因素 A、AC、BC 对因变量影响不显著。通过对各项 F 值的对比可知, 各因素对因变量的影响大小为压缩时间 B>回弹保持时间 C>测前速度 A。

表 6 响应值模型数学方差分析
Tab.6 Mathematical variance analysis of response value model

| 方差来源 | 平方和 | 自由度 | 均方 | F 值 | P 值 |
|----------------|------------|-------------|------------|--------------------|----------|
| 模型 | 5.01 | 9 | 0.56 | 39.04 | <0.0001 |
| A-测前速度 | 0.056 | 1 | 0.056 | 3.94 | 0.0876 |
| B-压缩时间 | 3.93 | 1 | 3.93 | 276.06 | < 0.0001 |
| C-回弹保持时间 | 0.16 | 1 | 0.16 | 11.40 | 0.0118 |
| AB | 0.14 | 1 | 0.14 | 9.87 | 0.0163 |
| AC | 2.500E-003 | 1 | 2.500E-003 | 0.18 | 0.6879 |
| BC | 6.400E-003 | 1 | 6.400E-003 | 0.45 | 0.5242 |
| A ² | 0.11 | 1 | 0.11 | 8.02 | 0.0253 |
| B ² | 0.43 | 1 | 0.43 | 30.21 | 0.0009 |
| C ² | 0.098 | 1 | 0.098 | 6.85 | 0.0346 |
| 误差 | 0.100 | 7 | 0.014 | | |
| 失拟项 | 0.038 | 3 | 0.013 | 0.82 | 0.5484 |
| 纯误差 | 0.062 | 4 | 0.015 | | |
| 合计 | 5.11 | 16 | | | |
| $R^2=0.9805$ | | $CV=1.59\%$ | | $R^2_{adj}=0.9554$ | |

2.3.3 响应面分析

通过二次回归模型拟合的等高线图和响应曲面图如图 9~11 所示。可通过响应面变化情况和等高线的稀疏程度来判断测前速度、压缩时间、回弹保持时间之间交互作用对烟丝回弹特性的影响。若等高线接近圆形或呈圆形，说明两因素交互作用不明显，若呈椭圆形或马鞍形则表示两因素交互作用显著。由响应面图 9 可知，在测试范围内，烟丝回弹特性随着压缩时间的增加呈逐渐上升的趋势，随测前速度的增加而呈现先上升后下降的趋势。在低测前速度、低压缩时间范围条件

下，烟丝回弹特性随测前速度、压缩时间的增加表现出上升趋势，在高测前速度、高压缩时间条件下其上升趋势变缓。由图 10 可知测前速度和回弹保持时间无明显交互作用。在测试范围内，烟丝回弹特性随测前速度的增加呈逐渐上升后下降的趋势，随回弹保持时间的增加而呈现先上升后下降的趋势。图 11 可知压缩时间和回弹保持时间交互作用不显著，这与方差分析结果一致。烟丝回弹特性随压缩时间的增加而增大，随回弹保持时间的增加呈先上升后降低的趋势。

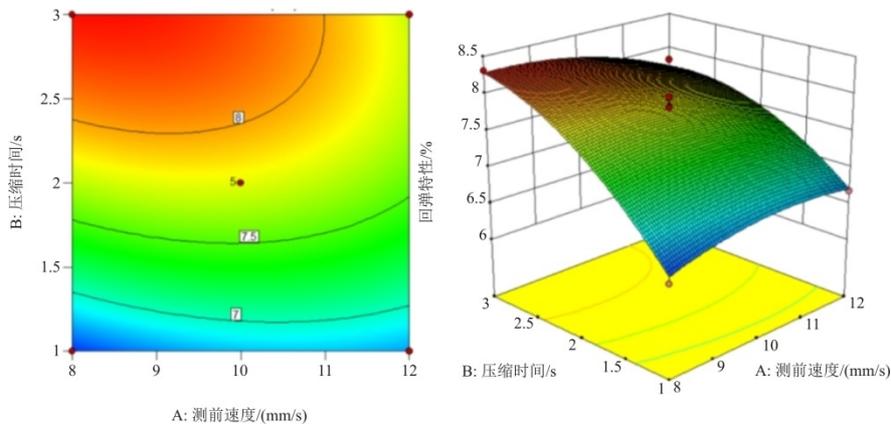


图 9 压缩时间和测前速度对烟丝回弹特性测定结果影响的等高线图和响应面图

Fig.9 Contour diagram and response surface diagram of the influence of compression time and pre measurement speed on the measurement results of cut tobacco springback characteristics

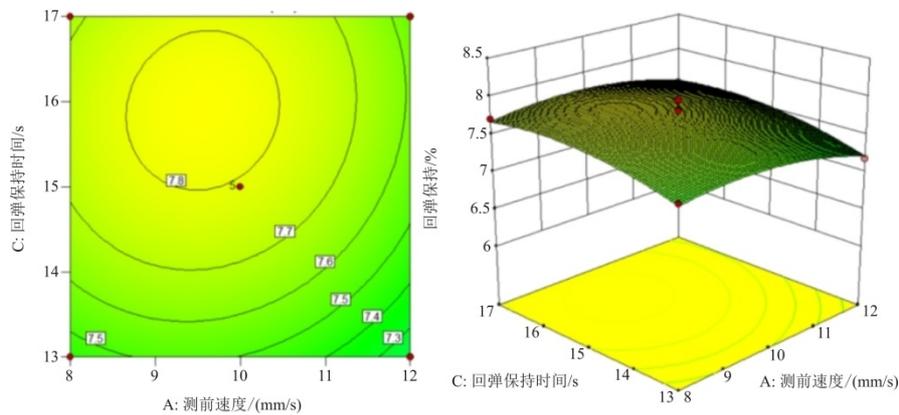


图 10 回弹保持时间和测前速度对烟丝回弹特性测定结果影响的等高线图和响应面图

Fig.10 Contour diagram and response surface diagram of the influence of springback holding time and pre-test speed on the measurement results of cut tobacco springback characteristics

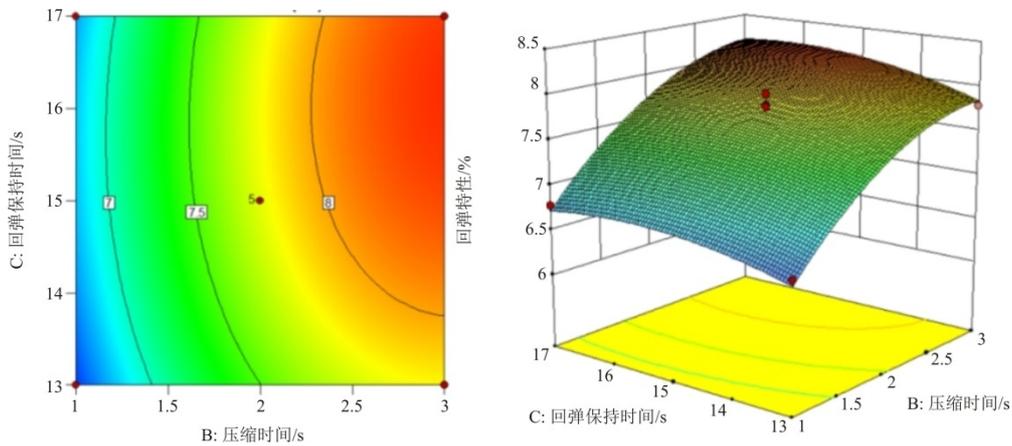


图 11 压缩时间和回弹保持时间对烟丝回弹特性测定结果影响的等高线图和响应面图

Fig.11 Contour diagram and response surface diagram of the influence of compression time and springback holding time on the measurement results of cut tobacco springback characteristics

2.3.4 响应面最佳条件预测和验证分析

通过回归模型的预测得到的最佳测试参数为测前速度 12 mm/s、压缩时间为 2.845 s、回弹保持时间为 16.324 s，此时烟丝回弹特性的预测值为 7.816%，为了方便操作，将优化的条件改为测前速度 12 mm/s、压缩时间为 3 s、回弹保持时间为 16 s，在此优化条件下进行 5 次平行实验，结果表明烟丝回弹特性为 (7.64±0.20) %，结果和预测值较为接近，说明该模型准确可靠。

2.3.5 烟丝回弹特性检测方法的验证

为考察方法的可靠性，在最优条件下，对该方法的日内、日间精密度进行考察。安排 3 名操作人员，使用同一台实验仪器，分别在 3 d 内的不同时间点对同一样品重复检测 5 次，测得日内精密度、日间精密度。表 7 可知，该方法日内精密度在 2.02%~4.20%之

间，日间精密度为 2.93%。说明该方法相对稳定、精密度较好。

表 7 方法的精密度
Tab.7 Precision of method

| 测定时间 | 第 1 天 | 第 2 天 | 第 3 天 |
|---------|-------|-------|-------|
| | 实验员 A | 实验员 B | 实验员 C |
| 8:00 | 7.34 | 6.93 | 7.10 |
| 10:00 | 7.23 | 7.27 | 7.19 |
| 12:00 | 7.17 | 7.62 | 7.14 |
| 14:00 | 7.02 | 7.06 | 6.97 |
| 16:00 | 7.53 | 6.89 | 7.21 |
| 18:00 | 7.39 | 7.50 | 7.41 |
| 平均值 | 7.28 | 7.21 | 7.17 |
| RSD/% | 2.46 | 4.20 | 2.02 |
| 总平均值 | | 7.22 | |
| 总 RSD/% | | 2.93 | |

2.4 不同烟丝结构对烟丝回弹特性的影响

运用所建立的烟丝回弹特性检测方法，选取 BCDE 四种品牌的烟丝，长丝 (>3.35 mm)、中丝 (2.25~3.35 mm)、短丝 (1.00~2.25 mm) 和碎丝 (<1.00 mm) 四种类型的烟丝，进行烟丝结构与回弹特性的关系研究。

图 12 分析可得，不同品牌烟丝的长丝、中丝、短丝、碎丝中，烟丝回弹特性最高的均为长丝，回弹特性最低的均为碎丝。

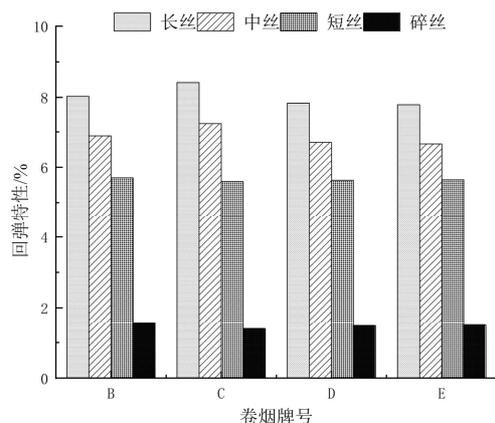


图 12 不同品牌烟丝结构的回弹特性

Fig.12 springback characteristics of cut tobacco of different brands

不同品牌烟丝的长丝、中丝、短丝、碎丝回弹特性有相同的变化趋势，烟丝回弹特性随着烟丝尺寸的增大而增大，即长丝的回弹特性>中丝的回弹特性>短丝的回弹特性>碎丝的回弹特性。不同牌号烟丝的长丝、中丝回弹特性之间差值基本为等值，同牌号烟丝长、中、短丝、碎丝之间回弹特性差距也十分明显。通过上述分析，可以得出结论：烟丝回弹特性在一定程度上受烟丝结构的影响，随着卷烟烟丝尺寸的提高，烟丝回弹特性也会提高。当烟丝结构过长时不利于卷烟燃烧锥掉落率和卷烟掉火头的改善^[20-21]。因此，适宜的烟丝结构可以保证烟丝的回弹能力，保持烟支填充的饱满度，提高产品质量。

3 结论

(1) 通过分析烟丝卷制过程烟丝压缩及回弹过程，将烟丝回弹特性 P 定义为烟丝束受压后回弹至固定直径时的能力，即回弹特性 $(P) = (F_2/F_1) \times 100\%$ ，建立了质构仪检测烟丝回弹能力的方法。

(2) 在单因素实验的基础上，采用响应面法优化了烟丝回弹特性的测试参数。选择 A/BE-d45 圆板探头，质构仪检测烟丝回弹能力的最适参数为：测前速

度 12 mm/s，测中速度 6 mm/s，触发力 4 g，回弹速度 1 mm/s，压缩时间 3 s，回弹保持时间 16 s。经验证，该方法的日内精密度在 2.02%~4.20%之间，日间精密度为 2.93%，说明该方法相对稳定、精密度较好。

(3) 烟丝回弹特性受烟丝结构影响，烟丝尺寸越长，烟丝回弹特性越大，因此适宜的烟丝结构可以保证烟丝回弹能力，保持烟支的填充的饱满度，提高产品质量。

参考文献

- [1] 方畅. 基于 PROTOS 90 高速烟机设备的设备综合效率研究改造[D]. 华南理工大学, 2018.
FANG Chang. Research and transformation of equipment comprehensive efficiency based on PROTOS 90 high-speed smoke machine equipment[D]. South China University of technology, 2018.
- [2] 姚二民, 储国海. 卷烟机械[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2005.
YAO Ermin, CHU Guohai. Cigarette machinery[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2005.
- [3] YC/T 152—2001, 卷烟烟丝填充值的测定[S].
YC/T 152-2001, Determination of filling value of cut tobacco[S].
- [4] YC/T 186—2004, 卷烟烟丝弹性的测定方法[S].
YC/T 186-2004, Test method for elasticity of cut tobacco[S].
- [5] 刘国栋, 王旭锋, 李向阳. 制丝工艺参数对烟叶叶丝耐加工性和填充值的影响[J]. 河南农业科学, 2015,44(08):145-148.
LIU Guodong, WANG Xufeng, LI Xiangyang. Effects of processing parameters on the processability and filling value of tobacco leaf silk[J]. Henan Agricultural Science, 2015, 44(08): 145-148.
- [6] 张迪, 张乾, 朱建新, 等. 烘丝工艺参数对叶丝弹性和填充值的影响[J]. 云南化工, 2015,42(06):6-10.
ZHANG Di, ZHANG Qian, ZHU Jianxin, et al. Effects of drying process parameters on leaf elasticity and filling value[J]. Yunnan chemical industry, 2015,42(06): 6-10.
- [7] 王岩, 朱文魁, 刘楷丽, 等. 滚筒分段变温干燥方式下烤烟叶丝质量的变化特征[J]. 烟草科技, 2015,48(08):60-66.
WANG Yan, ZHU Wenkui, LIU Kaili, et al. Variation characteristics of leaf quality of Flue-cured Tobacco under drum section variable temperature drying[J]. Tobacco science and technology, 2015,48(08): 60-66.
- [8] 张婷, 王洪炜, 汪宏毅, 等. 湖北白肋烟感官质量与理化指标的关系模型构建[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2013, 31(02):125-128+144.
ZHANG Ting, WANG Hongwei, WANG Hongyi, et al. Construction of relationship model between sensory quality and physicochemical indexes of Hubei burley tobacco[J]. JOURNAL OF HUBEI UNIVERSITY FOR NATIONALITIES (NATURAL SCIENCE EDITION), 2013,31(02): 125-128+144.
- [9] 程向红, 王宏伟, 楚文娟, 等. 自然醇化对烟梗可用性的影响[J]. 烟草科技, 2019,52(05):50-56+76.
CHENG Xianghong, WANG Hongwei, CHU Wenjuan, et al. Effect of natural aging on usability of tobacco stalk[J]. Tobacco science and technology, 2019,52 (05): 50-56+76.
- [10] 唐军, 唐丽, 周冰, 等. 烟丝填充值与烟支重量及稳定性的相关分析[J]. 安徽农业科学, 2014,42(18):5977-5979.
TANG Jun, TANG Li, ZHOU Bing, et al. Correlation analysis between cut tobacco filling value and cigarette weight and stability[J]. Anhui Agricultural Science, 2014,42(18): 5977-5979.

- [11] 林芳栋, 蒋珍菊, 廖珊, 等. 质构仪及其在食品品质评价中的应用综述[J]. 生命科学仪器, 2009,7(05):61-63.
LIN Fangdong, JIANG Zhenju, LIAO Shan, et al. Review on texture analyzer and its application in food quality evaluation[J]. Life science instruments, 2009,7 (05): 61-63.
- [12] 李晓, 陈科冰, 韩明, 等. 质构仪在烟叶力学特性检测中的应用进展[J]. 轻工学报, 2021,36(3):63-69.
LI Xiao, CHEN kebing, HAN Ming, et al. Application progress of texture analyzer in the detection of mechanical properties of tobacco leaves[J]. Journal of light industry, 2021,36(3): 63-69.
- [13] 李晓, 陈科冰, 韩明, 等. 基于质构仪穿刺模式的烟叶脆性定量评价方法[J]. 烟草科技, 2021,54(6):83-91.
LI Xiao, CHEN Keping, HAN Ming, et al. Quantitative evaluation method of tobacco leaf brittleness based on puncture mode of texture analyzer[J]. Tobacco science and technology, 2021,54(6): 83-91.
- [14] 沈进, 宋成剑, 胡梦岩. 基于质构仪的造纸法再造烟叶柔软度评价方法[J]. 烟草科技, 2020,53(7):87-91.
SHEN Jin, SONG Chengjian, HU Mengyan. Evaluation method of softness of reconstituted tobacco leaves by papermaking based on texture analyzer[J]. Tobacco science and technology, 2020,53(7): 87-91.
- [15] 胡梦岩, 宋成剑, 李德贵, 等. 造纸法再造烟叶表面黏附力检测方法的建立及验证[J]. 烟草科技, 2019,52(2):96-100.
HU Mengyan, SONG Chengjian, LI Degui, et al. Establishment and verification of testing method for surface adhesion of reconstituted tobacco leaves by papermaking[J]. Tobacco science and technology, 2019,52 (2): 96-100.
- [16] 蔡正祥. 响应面法在机械结构优化问题上的应用研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019.
CAI Zhengxiang. Research on the application of response surface method in mechanical structure optimization[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019.
- [17] 卷烟工艺规范[M]. 中国轻工业出版社, 国家烟草专卖局颁发, 2016.
Cigarette Technology specification[M]. China Light Industry Press, Issued by State Tobacco Monopoly Administration, 2016.
- [18] 王晓辉, 段黎跃, 谭国治. 烟支烟丝密度测定 微波法[D]. 中国标准出版社, 2013.
WANG Xiaohui, DUAN Liyue, TAN Guozhi. Microwave method for measuring the density of cut tobacco[D]. China Standards Press, 2013.
- [19] 张秋会, 宋莲军, 黄现青, 等. 质构仪在食品分析与检测中的应用[J]. 农产品加工, 2017(24):52-56.
ZHANG Qiuhui, SONG Lianjun, HUANG Xianqing, et al. Application of texture analyzer in food analysis and detection[J]. Agricultural products processing, 2017 (24): 52-56.
- [20] 赵秋蓉, 吴迪, 李力群, 等. 烟丝结构对卷烟燃烧锥掉落率的影响分析[J]. 农产品加工, 2017(02):40-43.
ZHAO Qiurong, WU Di, LI Liqun, et al. Structure of cut tobacco cigarette burning taper drop rate of impact analysis[J]. Journal of agricultural products processing, 2017(02): 40-43.
- [21] 瞿莹莹, 云雪, 杨钊, 等. 不同切丝模式对烟丝结构及卷烟掉火头的影响[J]. 贵州农业科学, 2017,45(03):112-114.
ZI Yingying, YUN Xue, YANG Fang, et al. Effects of different cutting modes on structure of cut tobacco and fire drop of cigarette[J]. Guizhou agricultural sciences, 2017,45(03):112-114.

Establishment and parameter optimization of a method for detecting springback characteristics of cut tobacco

LI Xiao¹, LI Jinfeng¹, GUO Pengwei¹, HE Zixi¹, WEI Xuhe¹, SUN Mi², WANG Haoyu², JI Xiaonan^{2*}

¹ School of Food and Biological Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;

² Technology Center, China Tobacco Henan Industrial Co., Ltd, Zhengzhou 450000, China

Abstract: [Background] This study aims to solve the problem that physical indicators such as cut tobacco filling value and elasticity cannot comprehensively and truly reflect the impact of cut tobacco springback on cigarette quality during rolling. [Methods] A set of testing methods for the springback characteristics of cut tobacco were established and tested by texture analyzer, and the repeatability and difference of the methods were verified. Through single factor and response surface optimization, the best test parameters were determined, and such method was used to explore the influence of different cut tobacco structures on springback characteristics. [Results] (1) By analyzing the process of cut tobacco compression and springback in the process of cigarette rolling, the springback characteristic P of cut tobacco is defined as the ability of the compressed cut tobacco bundle to rebound to a fixed diameter. (2) The best conditions for the texture analyzer to measure the springback characteristics of cut tobacco are list as follow: the probe model was A/BE-d45 round plate probe, the pre measurement speed was 12mm/s, the measurement speed was 6mm/s, the trigger force was 4g, the springback speed was 1mm/s, the compression time was 2s, and the springback holding time was 15s. The inter day and intra day precision of this method were less than 4.20% and 2.93%, respectively. (3) The springback characteristics of cut tobacco are affected by the structure of cut tobacco. The longer the size of cut tobacco, the greater the springback characteristics of cut tobacco. [Conclusion] This characterization method is scientific and feasible, which has good precision, and can accurately measure the springback characteristics of cut tobacco. Reasonable cut tobacco structure can ensure the resilience of cut tobacco, maintain the fullness of cigarette filling, and improve product quality.

Keywords: cut tobacco; texture analyzer; springback characteristics; response surface; cut tobacco structure

*Corresponding author. Email: hnzy_jxn@163.com