



刘又维,吴晓炯,张齐,等.不同特性烟丝应力松弛性能的特征规律研究[J].轻工学报,2026,41(2):133-142.
LIU Y W, WU X J, ZHANG Q, et al. Study on characteristic laws of stress relaxation performance of cut tobacco
with different properties[J]. Journal of Light Industry, 2026, 41(2): 133-142. DOI: 10.12187/2026.02.013

不同特性烟丝应力松弛性能的特征规律研究

刘又维¹, 吴晓炯¹, 张齐², 斯勇¹, 何晋¹, 李辉², 颜晓冬¹

1. 上海烟草集团有限责任公司 技术中心, 上海 201315;

2. 中国烟草总公司郑州烟草研究院, 河南 郑州 450001

摘要:【目的】研究不同特性烟丝的应力松弛规律及流变学特性。【方法】以不同产区、部位、切丝宽度的烟丝及所卷制的中支卷烟为研究对象,通过测定应力松弛时间比率、平衡应力、黏性指数等参数,结合烟丝应力松弛流变学模型,分析烟丝特性与烟支物理指标对烟丝应力松弛性能的影响规律。【结果】下部烟丝的应力松弛时间比率显著低于上部和中部烟丝,且平衡应力较高,表现出相对更好的流变学稳定性;切丝宽度为0.8 mm时,烟丝的弹性和填充性能均达到相对最优水平;不同产区烟丝样品的应力松弛性能表现出明显差异,云南烟丝样品的应力松弛时间比率较高、较为柔软,河南烟丝样品具有较低的应力松弛时间比率和较好的弹性;平衡应力与修正封闭吸阻存在较强的相关性,相关系数达0.81。【结论】烟丝应力松弛性能随产区、部位及切丝宽度的不同呈现规律性变化,平衡应力等流变学参数相较于填充值能更全面地反映烟丝的力学性能,这为制丝与卷接关联性研究提供了新思路。

关键词:烟丝;应力松弛;流变学;平衡应力;烟支物理指标

中图分类号:TS45 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2026)02-0133-10

0 引言

烟丝的物理特性直接影响成品烟支的品质。目前常用的烟丝物理特性表征指标包括填充值^[1]和弹性^[2-3]。填充值是表征烟丝填充能力的静态指标,可以在一定程度上反映烟丝的品质,但未能展示烟丝在卷制过程中的压缩和松弛行为。弹性则是衡量烟丝在完全释压状态下回弹能力的指标,但烟支卷制过程中的压缩状态并非完全释压,因此弹性并不能准确描述烟丝在实际卷制中的动态力学

变化^[4],业界急需建立制丝工艺与卷接工艺相关联的动态力学指标。

烟丝是一种黏弹性原料,其流变学特性是影响实际生产过程中卷制差异的核心因素^[5]。目前国内学者通过应力松弛性能来表征农业物料等黏弹性原料的流变特性^[6]。例如,金楠等^[7]基于五元件广义麦克斯韦模型建立了饲料颗粒应力松弛流变模型,在各种湿热处理条件下,该模型的决定系数 R^2 大于0.988,其预测值与实验值的离差平方和处于0.016~0.026范围之内。杜晓雪等^[8]使用2

收稿日期:2024-06-09;修回日期:2025-07-30;出版日期:2026-04-15

基金项目:上海烟草集团有限责任公司科技项目(K2024-1-016P);中国烟草总公司重点研发项目(110202501016(S2-08))

作者简介:刘又维(1996—),男,江苏省徐州市人,上海烟草集团有限责任公司工程师,主要研究方向为烟草工艺。E-mail: liuyouwu@sh.tobacco.com.cn

通信作者:颜晓冬(1982—),男,上海市人,上海烟草集团有限责任公司工程师,主要研究方向为烟草工艺。E-mail: yanxd@sh.tobacco.com.cn

个 Maxwell 单元与 1 个等效弹簧并联组合的五元件构建了甜高粱应力松弛模型,其拟合相关系数大于 0.99,应力迅速衰减时间和平衡弹性模量的取值范围分别为 4.667~18.410 s 和 69.125~358.708 kPa。房佳佳等^[9]基于无线电阻应变仪与 ANSYS 模拟相结合的方法,确定了紫花苜蓿应力松弛过程中的流变学模型为五元件广义 Maxwell 模型,并利用残数法求得了模型中的应力松弛时间和平衡应力流变分别为 76.92 s、23.25 s 和 3.65 kPa。目前烟丝的动态力学特性研究尚未得到充分论证。麦克斯韦模型和广义麦克斯韦模型被广泛用于表征黏弹性物料的应力松弛等流变学行为^[10],该模型同时具备固体的弹性性能和液体的流动属性,能够量化表征不同特性烟丝在压缩后的应力松弛规律,进而为质量评估与工艺优化提供可靠依据。

此外,烟丝的应力松弛规律及黏弹性本质上与其原料特性密切相关。作为天然农产品,烟叶的物理结构和化学组成显著受产区环境的调控,这为解析烟丝应力松弛性能的差异提供了重要视角。气候因素是影响烟叶品质的主要生态外因,其中降水量、日照时数及土壤环境均会对烟叶纤维的发育状态、化学成分乃至烟丝的物理特征产生显著影响^[11-12]。余建飞等^[13]研究发现,烟叶含梗率与成熟期降水量呈负相关,即降水集中可能导致烟丝结构中梗签等成分占比相对较高。这些环境驱动的原料特性差异有可能通过改变烟丝的微观结构和力学基础,最终体现在烟丝应力松弛性能上。然而,目前针对不同产区烟丝应力松弛性能与环境因素的关联研究仍较薄弱,难以系统解释产区差异的本质原因。

鉴于此,本文拟以原料产地、烟叶部位、切丝宽度等为考查因素,通过应力松弛流变学模型及烟丝压缩流变实验,分析不同特性烟丝在应力松弛性能方面的差异性规律,并探讨其与烟支物理指标的相关性,以期揭示烟丝流变特性对卷烟加工质量的影响机制。

1 材料与方法

1.1 主要材料与仪器

主要材料:河南、云南、福建、江西等不同产地不同部位的单品种烟叶原料。

主要仪器:Venticell 型烘箱,德国 MMM 公司;XPR603 S 型电子天平,瑞士 METTLER TOLEDO 公司;D51 型填充值测定仪,德国 BORGWALDT 公司;烟丝压缩流变测试仪,中国烟草总公司郑州烟草研究院;QTM835U7 型烟支物理综合测试台,英国 CERULEAN 公司;SMI PDV 型吸阻检测仪,德国 HAUNI 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品原料筛选 为了筛选具有代表性的样品原料,以拉力、单叶重、叶质重等物理特性指标为依据,对烟叶样品进行筛选分析。分析对象涵盖 2019—2021 年不同产区的上、中、下 3 个部位的烟叶。筛选过程采用主成分分析(PCA)对各物理特性指标进行降维,提取主要特征变量,以突出不同产区烟叶样品的差异性,并在此基础上运用 Fisher 聚类分析对样品进行分类,根据聚类结果筛选 3 个产区的烟叶原料。为提升研究结果的实践参考价值,筛选过程需结合公司原料调拨的实际情况,优先选取与生产应用关联紧密的产区。此外,为确保筛选结果的科学性与代表性,需进一步对样品之间的物理特性指标进行对比分析。

1.2.2 样品制备 将筛选出的各产地烟叶按投料量 480 kg 进行投料,在产能为 500 kg/h 的产线上进行制丝实验。实验过程中涉及的烟叶预处理、加料等工序均采用同一加工参数,采用固定样品含水率的方法,控制风选出口叶丝含水率 13.0%,持续生产至少 30 min 以保证样品批次的稳定性。由此得到上述各产地单品种烟叶对应的 15 个成品烟丝样品,每批实验完成后将成品烟丝样品装箱并储存在恒温恒湿(温度(24±2)℃、相对湿度(55±3)%,下同)条件下待卷包实验使用。

将上述每批烟丝样品使用同一卷烟机台(机型为 ZJ118)与相同辅材进行卷制,烟支规格为中支卷烟。卷制过程采用填充值控制法,保持其他参数不变条件下根据样品调整目标质量,具体方法如下:根据前一批次样品的填充值 φ_{i-1} ($i \geq 2$) 与当前批次实测填充值 φ_i 的比例关系,估算目标质量参考值,同时在每批实验开始阶段对估算所得目标质量参考值进行动态调整,确保每批实验的平整器位置处于同一水平。该标准化操作旨在实现双重控制

目标,一方面使每批烟支样品内部烟柱体积保持一致,另一方面最大限度保证不同批次之间设备加工参数的一致性。待卷烟机运行稳定后,每批样品取样烟支及跑条烟丝于恒温恒湿条件下储存,待测。

1.2.3 烟丝应力松弛性能测定 参照韩顺起等^[14]

建立的烟丝应力松弛性能测定方法,对烟丝进行压缩流变实验,分别采用五元件广义 Maxwell 模型和分数阶模型建立烟丝压缩应力松弛模型。五元件广义 Maxwell 模型如下式所示:

$$\sigma(t) = \sigma_1 e^{-t/T_1} + \sigma_2 e^{-t/T_2} + \sigma_{eq} = \varepsilon_0 (E_1 e^{-t/T_1} + E_2 e^{-t/T_2} + E_{eq})$$

式中, $\sigma(t)$ 为 t 时刻烟丝的应力/kPa; σ_{eq} 为平衡应力/kPa,即应力松弛完成后的残留应力,表征烟丝在恒定压缩条件下达到稳定状态的应力; ε_0 为烟丝的初始应变; E_1 、 E_2 为 Maxwell 元件中 2 个弹簧的弹性模量/kPa; T_1 、 T_2 分别为 2 个 Maxwell 元件的应力松弛时间/s; E_{eq} 为并联弹簧的弹性模量/kPa。

应力松弛的快慢取决于烟丝的初始应力与应力松弛时间的比值,可用 α 表示,即烟丝的应力松弛时间比率/(kPa · s⁻¹),定义为下式, α 越大,表明一定时间内烟丝的应力松弛速度越快。

$$\alpha = \frac{\varepsilon_0 E_1}{T_1} + \frac{\varepsilon_0 E_2}{T_2}$$

分数阶模型^[15]公式如下:

$$\sigma(t) = \frac{K_{\varepsilon_0}}{\Gamma(1-\beta)} t^{-\beta}$$

式中, K 为松弛模量; $\Gamma(1-\beta)$ 为 Gamma 函数; β 为黏性指数(取值范围为 $0 \leq \beta \leq 1$), β 越小表示烟丝的弹性越大,流变行为更接近理想弹性体,反之则烟丝表现出更强的黏性特征。

根据两模型之间参数的相关性^[16],以五元件 Maxwell 模型获得的平衡应力 σ_{eq} 、应力松弛时间比率 α 及分数阶模型获得的黏性指数 β 作为描述烟丝应力松弛过程的特征参数。

1.2.4 其他常规指标测定 烟丝含水率根据《烟草及烟草制品 试样的制备和水分测定 烘箱法》(YC/T 31—1996)^[17]规定的方法进行测定;烟丝填充值按照《卷烟 烟丝填充值的测定》(YC/T 152—2001)^[18]方法,采用填充值测量仪进行测定;烟支物

理指标采用烟支物理综合测试台测定;光支烟封闭吸阻采用吸阻检测仪进行测定。

2 结果与分析

2.1 样品原料筛选结果分析

烟叶关键物理特性的 PCA 图如图 1 所示。由图 1 可知,第一主成分(X 轴)主要由质量和密度构成,第二主成分(Y 轴)由拉力构成。质量和密度直接关联烟叶的细胞排列密度与纤维结构特征,能够捕捉不同产区之间的差异^[19-20];而拉力主要表征烟叶被拉断时的极限抗张强度,其与本研究关注的非破坏形变条件下的应力松弛行为关联性相对较弱,因此样品筛选策略优先聚焦于沿 X 轴质量和密度拉开梯度,由此确定了西南、东南、华中 3 个产区的代表性烟叶原料,具体筛选结果及各产地烟丝样品设计参数见表 1。各产地烟丝样品应力松弛性能参数及对应成品烟支物理指标测定结果见表 2。

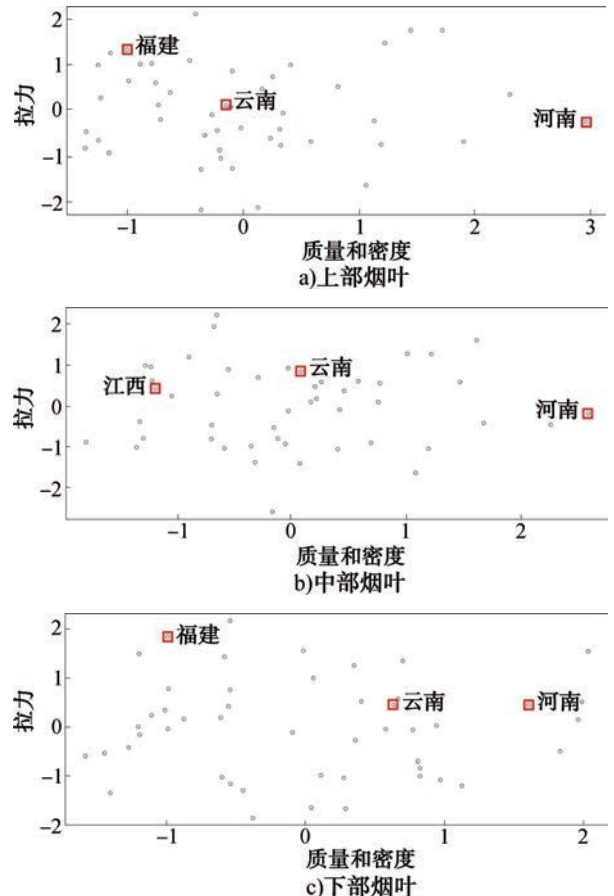


图 1 不同部位烟叶关键物理特性的 PCA 图
Fig. 1 PCA plots of key physical properties of tobacco leaves from different parts

2.2 不同部位烟丝应力松弛性能分析

不同部位烟丝样品应力松弛性能水平及应力松弛曲线如图 2 所示。由图 2a) —c) 可知,下部烟丝样品的应力松弛时间比率显著低于上部和中部烟丝样品;此外,随着烟丝样品部位由上至下变化,平衡应力呈递增趋势,而黏性指数则呈递减趋势,

表 1 烟叶原料筛选结果及各产地烟丝样品设计参数
Table 1 Screening results of tobacco raw materials and design parameters of cut tobacco samples from different production areas

产区	产地	部位	烟丝宽度/ mm
东南	福建	上部	0.8
西南	云南	上部	0.8
华中	河南	上部	1.0
华中	河南	上部	0.8
华中	河南	上部	0.6
东南	江西	中部	0.8
华中	河南	中部	0.8
西南	云南	中部	1.0
西南	云南	中部	0.8
西南	云南	中部	0.6
西南	云南	下部	0.8
华中	河南	下部	0.8
东南	福建	下部	1.0
东南	福建	下部	0.8
东南	福建	下部	0.6

表明下部烟丝不仅具备较高的平衡应力,还具有较优的弹性。由图 2d) 可知,下部烟丝样品的应力松弛和衰减速度明显慢于上部和中部烟丝,且最终达到的平衡应力相对较高。因此,下部烟丝在加工过程中具备较好的流变力学稳定性,中部烟丝次之,上部烟丝最差。马爱国等^[21]通过对不同部位烟叶的内在品质进行研究发现,下部烟叶内含物质不充实,含纤维素等骨架物质较多,叶片结构相对疏松,这种结构特性使下部烟叶具备更强的填充性能。本研究结果与其较一致。

2.3 不同切丝宽度烟丝应力松弛性能分析

不同切丝宽度烟丝样品应力松弛性能水平及应力松弛曲线如图 3 所示。由图 3 可知,对于相同产区的样品,随着切丝宽度的增加平衡应力先升高后降低,而黏性指数则先降低后升高,这表明切丝宽度对烟丝的弹性和应力释放性能均具有一定的调节作用。应力松弛时间比率的变化并未表现出明显规律性,但在切丝宽度较小时,部分样品的应力松弛时间相对更高。这与已有研究^[22-23]结果较一致。其研究表明,切丝宽度从 0.6 mm 增加至 1.0 mm 时,成品烟丝的填充值呈先升高后降低的趋势,且切丝宽度为 0.8~0.9 mm 的烟丝的填充值相对

表 2 各产地烟丝样品应力松弛性能参数及对应成品烟支物理指标测定结果

Table 2 Stress relaxation parameters of cut tobacco samples from different production areas and determined physical indicators of corresponding finished cigarettes

产区	部位	烟丝宽度/ mm	填充值/ (cm ³ ·g ⁻¹)	应力松弛比率/ (kPa·s ⁻¹)	平衡应力/ kPa	黏性指数	光支烟质量均 值/mg	光支烟质量 sd/ mg	光支烟质量 cv/ %	光支烟封闭吸阻 均值/Pa	光支烟封闭吸阻 sd/Pa	光支烟封闭吸阻 cv/%	烟支硬度 均值/%	烟支硬度 sd/%	烟支硬度 cv/%
东南	上部	0.8	4.21	1.17	3.58	0.193	428.2	15.1	3.5	375.5	26.9	7.2	61.8	2.6	4.2
西南	上部	0.8	4.09	1.16	3.60	0.192	447.4	13.5	3.0	384.4	41.3	10.7	58.3	2.7	4.6
西南	下部	0.8	4.91	0.98	4.08	0.175	419.8	10.5	2.5	632.2	54.4	8.6	62.6	1.9	3.0
华中	下部	0.8	5.01	0.94	4.30	0.167	401.1	11.5	2.9	582.0	40.1	6.9	63.1	2.3	3.6
东南	中部	0.8	4.60	1.01	4.00	0.175	439.6	11.6	2.6	571.5	48.4	8.5	53.3	2.5	4.7
华中	中部	0.8	4.32	1.15	3.78	0.183	447.8	11.8	2.6	590.8	39.7	6.7	60.2	2.2	3.7
西南	中部	1.0	4.10	1.17	3.53	0.193	418.8	15.4	3.7	387.5	31.7	8.2	50.3	2.1	4.2
西南	中部	0.8	3.75	1.27	3.63	0.185	492.2	11.8	2.4	624.5	52.4	8.4	55.6	2.3	4.1
西南	中部	0.6	4.29	1.37	3.50	0.194	449.6	13.6	3.0	492.1	31.1	6.3	51.1	2.5	4.9
东南	下部	1.0	4.86	1.06	4.06	0.175	380.6	12.9	3.4	700.4	55.3	7.9	56.9	2.2	3.9
东南	下部	0.8	4.82	0.98	4.19	0.170	439.0	12.9	2.9	1 038.1	47.4	4.6	62.5	2.4	3.8
东南	下部	0.6	4.84	0.97	3.99	0.178	388.6	12.1	3.1	766.0	51.7	6.7	56.3	1.8	3.2
华中	上部	1.0	5.54	0.91	3.51	0.184	438.0	16.0	3.7	455.6	54.2	11.9	58.7	2.2	3.7
华中	上部	0.8	5.17	1.04	3.61	0.181	446.6	13.5	3.0	524.8	43.2	8.2	57.9	2.3	4.0
华中	上部	0.6	5.22	0.99	3.54	0.187	420.6	13.1	3.1	342.5	30.3	8.8	61.1	2.6	4.3

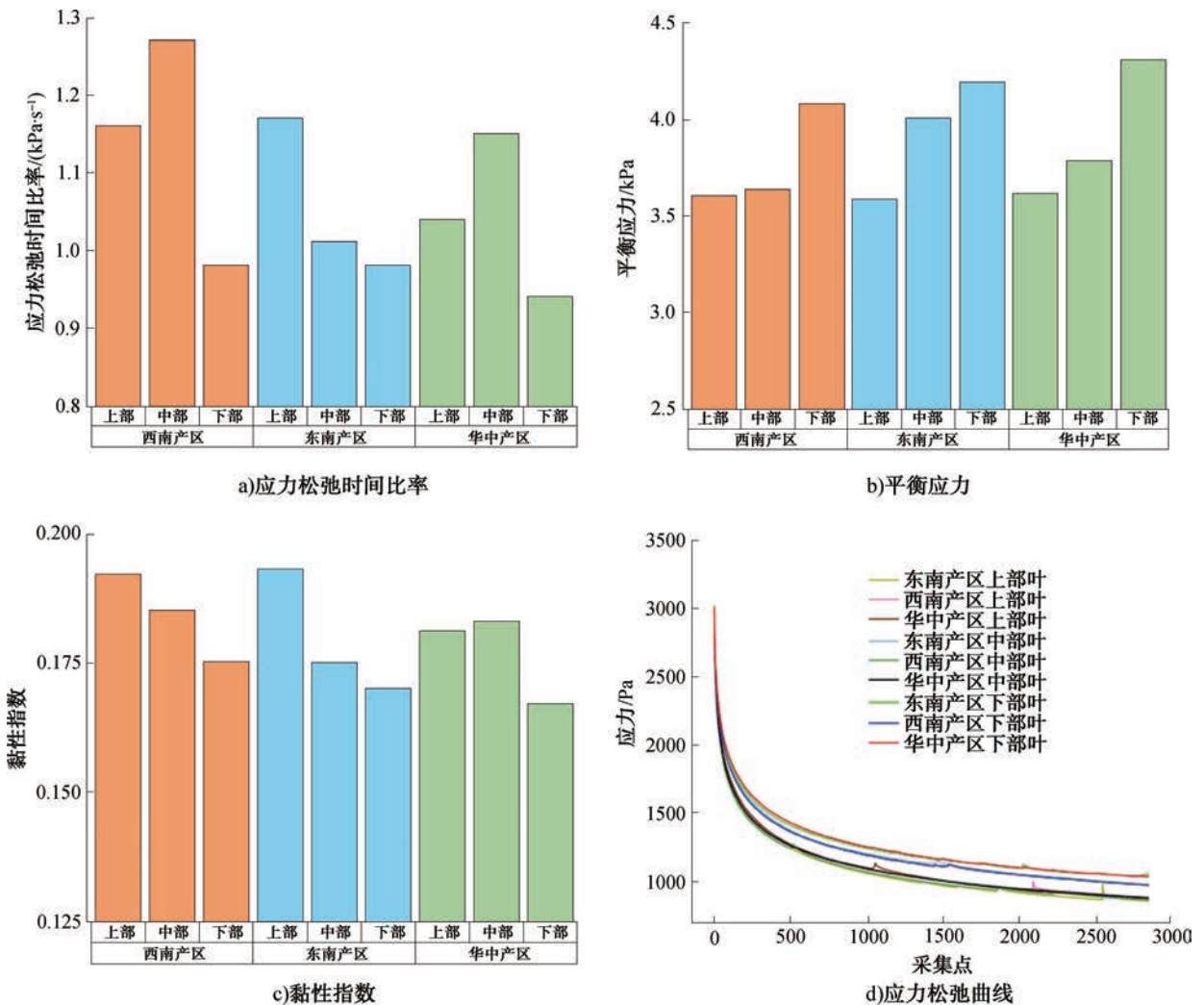


图2 不同部位烟丝样品应力松弛性能水平及应力松弛曲线

Fig. 2 Stress relaxation characteristics and curves of cut tobacco samples at different stalk positions

较高。这反映了不同切丝宽度对烟柱内部空隙率会产生影响,进而作用于其应力松弛性能。在本研究中,切丝宽度为 0.8 mm 的样品表现出相对较优的应力松弛与填充性能。

2.4 不同产区烟丝应力松弛性能分析

不同产区烟丝样品应力松弛性能水平及应力松弛曲线如图 4 所示。由图 4 可知,不同产区烟丝样品在相同烟叶部位和切丝宽度的条件下,其应力松弛性能表现出一定的差异性和规律性。在应力松弛时间比率方面,西南和东南产区烟丝样品较华中产区烟丝样品更高,平衡应力更低,尤其是在中部烟丝中,西南产区烟丝样品的应力松弛时间比率明显高于东南和华中产区,表明西南产区烟丝样品在加工过程中具有更高的应力释放效率。黏性指

数的表现较为复杂,但整体上西南产区烟丝样品的黏性指数较高,反映出较弱的弹性,这与其应力松弛比率和平衡应力的变化趋势相一致,进一步说明了西南产区烟丝样品相较于另外 2 个产区烟丝样品在应力松弛性能方面的独特性。综上,不同产区烟丝样品的应力松弛时间比率、平衡应力及黏性指数表现出产地与部位的耦合特性。西南产区烟丝样品表现相对突出,其在加工过程中的应力释放效率更快、弹性较弱、更加柔软,这种特征可能与该产区日照充足、昼夜温差大、土壤孔隙度高等生态条件相关^[11-12]。华中产区烟丝样品则具有更好的弹性和较慢的应力释放,能够在烟柱内起到类似于骨架的支撑作用,这可能是由于华中产区烟叶成熟期降水集中,烟丝结构中刚性成分占比较高^[13],但因其

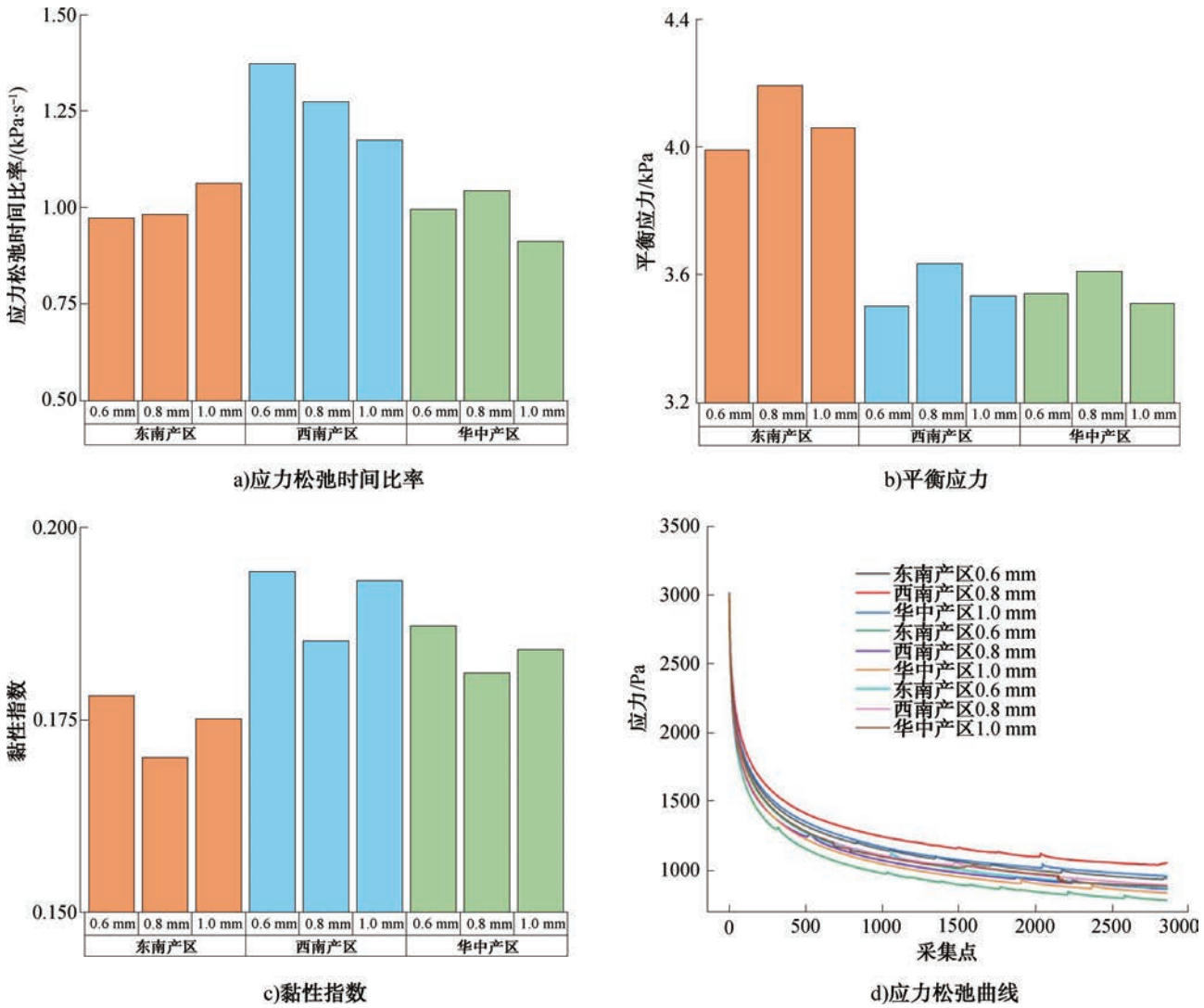


图3 不同切丝宽度烟丝样品应力松弛性能水平及应力松弛曲线

Fig. 3 Stress relaxation characteristics and curves of cut tobacco samples with different cut widths

样品表现为较弱的韧性,故需关注该产区烟丝样品在加工过程中的造碎程度。

2.5 应力松弛性能与烟支物理指标的关联性分析

吸阻是衡量烟支抽吸顺畅感的重要指标^[24],其中烟柱端的封闭吸阻对整体吸阻及其稳定性起着关键作用,而烟丝的力学特性和结构稳定性均显著影响烟柱端吸阻,并直接关系到烟支吸阻的整体表现^[25]。因此,本研究通过卷烟机台对各烟丝样品的光支烟进行取样,重点探讨应力松弛性能对光支烟封闭吸阻的影响机制。考虑到烟支质量的差异会对光支烟封闭吸阻产生影响,采用理想烟柱模型的

处理方法^[26]对光支烟封闭吸阻进行修正处理,以消除质量变化的干扰。将基准光支烟质量设定为428.2 mg(接近平均值)。修正封闭吸阻与填充值和平衡应力的线性拟合如图5所示。由图5可知,平衡应力与修正封闭吸阻之间呈现较高的线性相关性,皮尔逊相关系数达0.81,相比之下,填充值与修正封闭吸阻的相关性较低,仅为0.22。此外,通过逐步回归分析发现,在构建修正封闭吸阻的预测模型时,最终选择的自变量为平衡应力,而填充值未被纳入逐步回归模型,得到的回归方程为

$$\text{修正封闭吸阻} = -1\,506.26 + 546.13 \times \text{平衡应力}$$

模型的决定系数 $R^2 = 0.632$, F 值 = 22.4, 对应

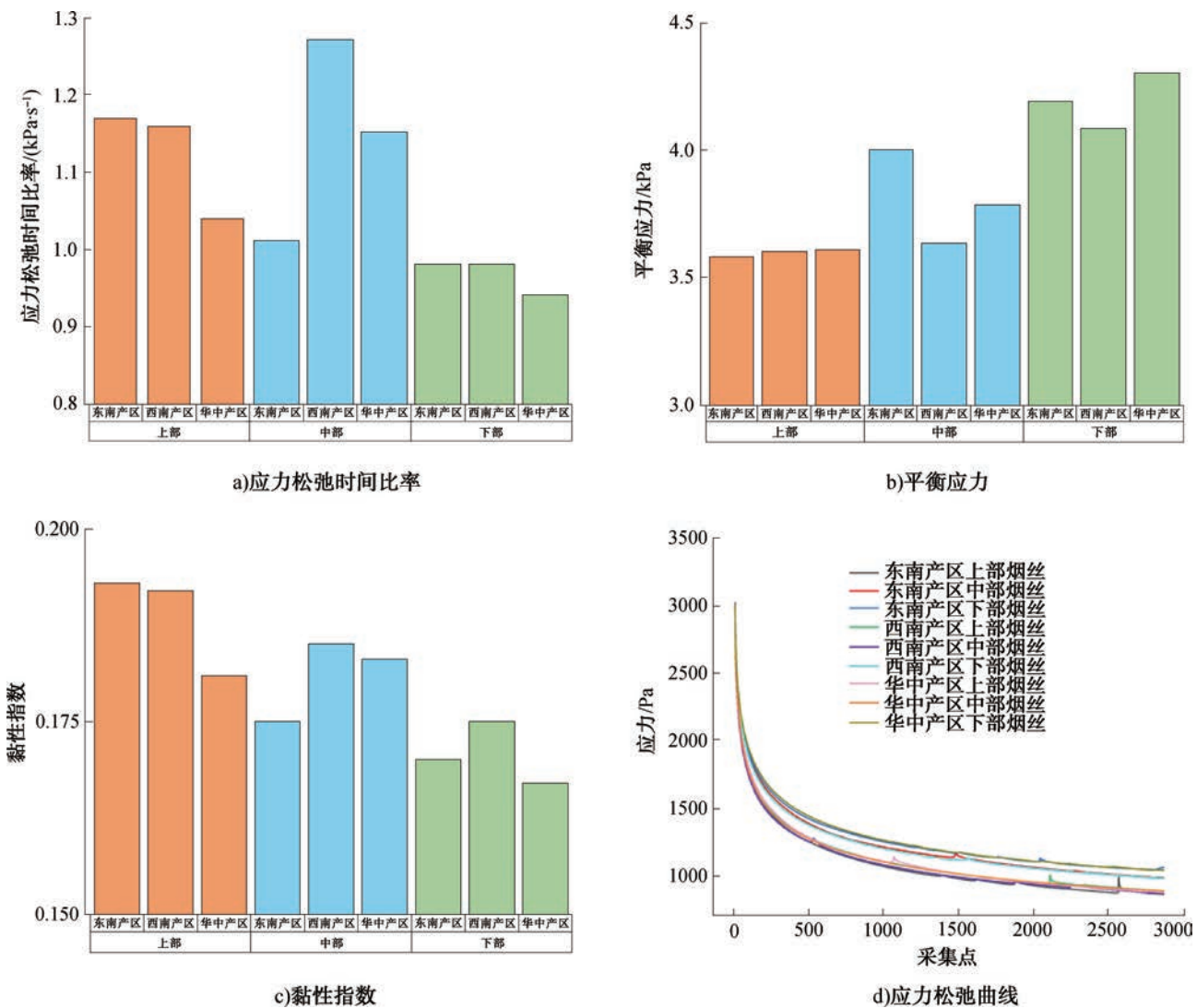


图 4 不同产区烟丝样品应力松弛性能水平及应力松弛曲线

Fig. 4 Stress relaxation characteristics and curves of cut tobacco samples from different production areas

的 P 值为 $0.0004 < 0.05$, 表明回归模型达到显著水平。这种差异可能源于平衡应力能够综合反映烟丝的力学性能, 包括压缩状态下的弹性、结构稳定性及应力松弛行为, 这些因素共同作用于烟支的吸阻特性, 填充值主要侧重于烟丝的填充能力, 难以更好地捕捉烟丝在加工过程中表现出的复杂力学特性。

此外, 从烟支物理综合测试数据中发现, 相同条件下不同烟丝部位的烟支样品中, 下部烟丝烟支样品的硬度最高, 这一现象与烟丝在卷烟加工过程中所受的压缩与应力释放行为密切相关。卷接加工过程中不同部位烟丝应力释放示意图如图 6 所示。由图 6 可知, 卷接加工过程中, 烟丝在卷

烟机供丝系统 (VE) 的流化床内, 通过风室负压被吸附至吸丝带上, 随后被输送至烟枪。先是经过烟枪内小压板和前边板被卷烟纸包裹, 继而经过大压板上胶后形成烟条, 烟丝束在这个过程中先后被翼板、压丝轮、烟枪和大压板不同程度地压缩。上部和中部烟丝样品在通过翼板和压丝轮时, 受到较大的压缩载荷并快速释放应力, 因此在形成烟条和成品烟支后, 其内部烟丝的平衡应力相对较小; 相比之下, 应力松弛时间比率较低的下部烟丝样品在通过烟枪和大压板形成烟条后, 其应力仍在释放并施加在卷烟纸上, 这一特性解释了在相同烟柱体积条件下, 下部烟丝烟支样品硬度更高的现象。

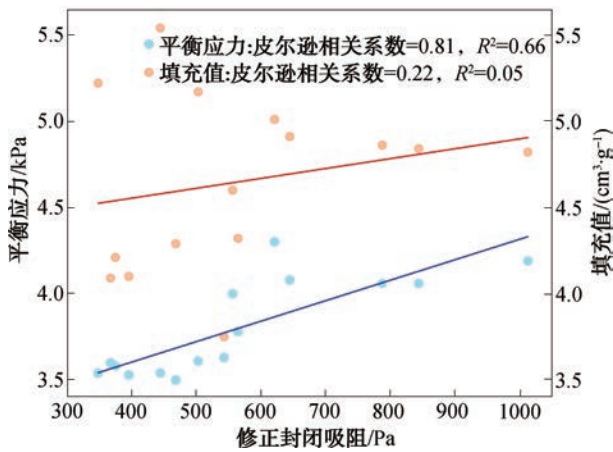


图5 修正封闭吸阻与填充值和平衡应力的线性拟合

Fig. 5 Linear fitting between normalized closed resistance, filling value and equilibrium stress

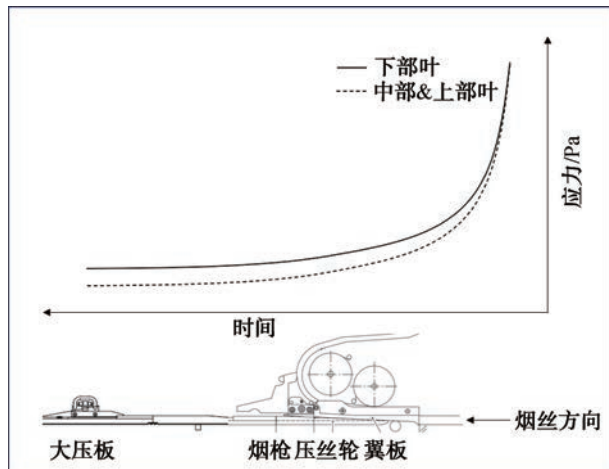


图6 卷接加工过程中不同部位烟丝应力释放示意图

Fig. 6 Schematic diagram of stress release of cut tobacco at different stalk positions during cigarette making and tipping process

3 结论

本文通过研究不同特性烟丝的应力松弛性能,结合原料部位、切丝宽度、产区等因素,分析了烟丝的流变学特性及其对卷烟加工和成品品质的影响,得出以下结论:1)在相同产区和切丝宽度条件下,下部烟丝的应力松弛时间比率显著低于上部和中部烟丝,同时平衡应力较高,表现出相对更优的流变力学稳定性,该特性同样在烟支硬度上得到充分体现;2)切丝宽度从0.6 mm增加到1.0 mm的过程中,烟丝应力松弛性能表现出非线性变化,在

0.8 mm时烟丝的弹性和填充性能均达到相对最佳水平;3)不同产区烟丝样品在相同加工条件下,其应力松弛性能表现出明显差异,云南烟丝样品的应力松弛时间比率较高,较为柔软,河南烟丝样品则具有更好的弹性和较慢的应力释放速度;4)平衡应力与修正封闭吸阻之间存在较强的相关性,平衡应力相较于填充值能够更全面地反映烟丝的力学性能。不同产区、不同部位烟丝的应力松弛性能呈现规律性变化,平衡应力等流变学参数相较于填充值能更全面地反映烟丝的力学性能,这为探索制丝与卷接关联性提供了新思路。

参考文献:

- [1] 国家烟草专卖局. 卷烟工艺规范[M]. 北京:中国轻工业出版社,2016.
National Tobacco Monopoly Administration. Cigarette manufacturing process specifications [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2016.
- [2] 国家烟草专卖局. 卷烟 烟丝弹性的测定方法:YC/T 186—2004[S]. 北京:中国标准出版社,2004.
National Technical Committee for Standardization of Tobacco. Cigarettes—Determination of elasticity of cut tobacco:YC/T 186—2004 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.
- [3] 王天怡,姚二民,董一雷,等. 温度对不同规格卷烟烟丝弹性的影响研究[J]. 轻工科技,2023,39(6):40-43,70.
WANG T Y, YAO E M, DONG Y L, et al. Study on the influence of temperature on the elasticity of cut tobacco of different specifications [J]. Light Industry Science and Technology, 2023, 39(6): 40-43, 70.
- [4] 李旭英. 草物料压缩流变动力学特性研究及压缩过程优化[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2006.
LI X Y. Rheodynamic characteristics of herbage materials in compression and optimization of compression process [D]. Huhehaote: Inner Mongolia Agricultural University, 2006.
- [5] 杨明韶. 农业物流变学[M]. 北京:中国农业出版社,2010.
YANG M S. Agricultural material flow mechanics [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2010.
- [6] MYHAN R, JACHIMCZYK E. Rheological properties of a straw layer [J]. Rheologica Acta, 2015, 54(1): 19-27.
- [7] 金楠,王红英,王威,等. 饲料颗粒成型的应力松弛特性研究[J]. 饲料工业,2025,46(5):12-18.
JIN N, WANG H Y, WANG W, et al. Study on stress relaxation characteristics of feed pellet molding [J]. Feed Industry, 2025, 46(5): 12-18.

- [8] 杜晓雪,郭文斌,王春光,等. 饲用甜高粱秸秆应力松弛特性及参数优化的试验研究[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(2): 123-131.
DU X X, GUO W B, WANG C G, et al. Stress relaxation characteristics and parameters optimization of feed sweet sorghum[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(2): 123-131.
- [9] 房佳佳,张永,杨明韶,等. 紫花苜蓿圆捆机卷压过程的应力松弛特性与模型建立[J]. 农业工程学报, 2018, 34(16): 50-56.
FANG J J, ZHANG Y, YANG M S, et al. Stress relaxation behavior and modeling of alfalfa during rotary compression[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(16): 50-56.
- [10] LIN C Y, CHEN Y C, LIN C H, et al. Constitutive equations for analyzing stress relaxation and creep of viscoelastic materials based on standard linear solid model derived with finite loading rate[J]. Polymers, 2022, 14(10): 2124.
- [11] 张强,孙力,邱晔,等. 云南烤烟主产区烟叶及其烟气主要化学成分的差异分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2010, 32(S1): 87-91.
ZHANG Q, SUN L, QIU Y, et al. Analysis on the differences of principal chemical components and smoke components of flue-cured tobacco in main tobacco-growing areas of Yunnan[J]. Journal of Yunnan University (Natural Science Edition), 2010, 32(S1): 87-91.
- [12] 黄中艳,王树会,朱勇,等. 云南烤烟 5 项化学成分含量与其环境生态要素的关系[J]. 中国农业气象, 2007, 28(3): 312-317.
HUANG Z Y, WANG S H, ZHU Y, et al. Relationships between content of leading chemical components of tobacco leaves and ecological factors in Yunnan Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2007, 28(3): 312-317.
- [13] 余建飞,郑福维,卿湘涛,等. 湘西烟区气候特征及其对烟叶外观质量和物理特性的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2018, 53(5): 43-51, 57.
YU J F, ZHENG F W, QING X T, et al. Analysis of climate factors and their influence on appearance qualities and physical characteristics of tobacco leaves in Xiangxi tobacco growing areas[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2018, 53(5): 43-51, 57.
- [14] 韩顺起,付丽丽,丁伟,等. 烟丝压缩过程中应力松弛模型的建立[J]. 烟草科技, 2023, 56(6): 78-84.
HAN S Q, FU L L, DING W, et al. Stress relaxation modeling for cut tobacco during compression[J]. Tobacco Science & Technology, 2023, 56(6): 78-84.
- [15] 郭文斌,王志鹏,候智博,等. 秸秆-薯渣混合物料应力松弛分数阶模型的建立及参数分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(13): 284-290.
GUO W B, WANG Z P, HOU Z B, et al. Parameter analysis and development of fractional Calculus model for stress relaxation of cornstalk and potato residues[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(13): 284-290.
- [16] 韩顺起. 烟草堆积散体压缩过程中的流变学行为及影响因素研究[D]. 郑州: 中国烟草总公司郑州烟草研究院, 2023.
HAN S Q. Study on rheological behavior and influencing factors of tobacco pile bulk compression[D]. Zhengzhou: Zhengzhou Tobacco Research Institute of China National Tobacco Corporation, 2023.
- [17] 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—Oven method: YC/T 31—1996[S]. Beijing: Standards Press of China, 1996.
- [18] 国家烟草专卖局. 卷烟 烟丝填充值的测定: YC/T 152—2001[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
State Tobacco Monopoly Administration. Cigarette—Determination of filling power of cut tobacco: YC/T 152—2001[S]. Beijing: Standards Press of China, 2001.
- [19] 刘丽,许自成. 烟草叶质重研究进展[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(35): 11487-11489.
LIU L, XU Z C. Research advances of leaf specific weight of flue-cured tobacco[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007, 35(35): 11487-11489.
- [20] 周定鹏,张鑫,徐玮杰,等. 中国八大生态区烤烟理化指标特征及模块配方设计分析[J]. 中南农业科技, 2025, 46(5): 88-94.
ZHOU D P, ZHANG X, XU W J, et al. Analysis of the characteristics of physicochemical indicators of roasted tobacco in the eight major ecological zones of China and the design of theular formula[J]. South-Central Agricultural Science and Technology, 2025, 46(5): 88-94.
- [21] 马爱国,宋德伟,孙在明,等. 不同部位烟叶外观特征与内在质量分析研究[J]. 山东农业科学, 2009, 41(5): 48-51.
MA A G, SONG D W, SUN Z M, et al. Study on appearance characters and internal quality of different stalk position flue-cured tobacco leaves[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2009, 41(5): 48-51.
- [22] 卢幼祥,叶浩,邵名伟,等. 切丝宽度对细支卷烟质量影响分析[J]. 湖南文理学院学报(自然科学版), 2023, 35(1): 53-57, 88.
LU Y X, YE H, SHAO M W, et al. Analysis of the influence of cut width on the quality of thin cigarettes[J]. Journal of Hunan University of Arts and Science

(Science and Technology), 2023, 35(1): 53-57, 88.

[23] 郭华诚, 吴艳艳, 张峻松, 等. 切丝宽度对细支烟卷制质量、主流烟气及感官质量的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(2): 194-198.

GUO H C, WU Y Y, ZHANG J S, et al. Influences of cut tobacco width on physical indexes, mainstream smoke and sensory quality of slim cigarette[J]. Food & Machinery, 2021, 37(2): 194-198.

[24] 周之武. 卷烟吸阻影响因素研究综述[J]. 轻工科技, 2020, 36(11): 9-10.

ZHOU Z W. A review of factors affecting cigarette draw resistance[J]. Light Industry Science and Technology, 2020, 36(11): 9-10.

[25] 朱宁宁, 董利利, 冯银龙, 等. 影响卷烟吸阻变化的多因素研究[J]. 食品工业, 2023, 44(5): 134-139.

ZHU N N, DONG L L, FENG Y L, et al. Study on the multi factors influencing the change of cigarette resistance [J]. The Food Industry, 2023, 44(5): 134-139.

[26] 吴晓炯, 居雷, 张宇, 等. 基于 Copula 函数和 GMM 联用的卷烟理想烟柱质量与压降物理模型[J]. 烟草科技, 2026, 59(1): 89-99.

WU X J, JU L, ZHANG Y, et al. An ideal mass and pressure drop physical model for tobacco rods based on the combination of Copula function and Gaussian mixture model[J]. Tobacco Science & Technology, 2026, 59(1): 89-99.

Study on characteristic laws of stress relaxation performance of cut tobacco with different properties

LIU Youwei¹, WU Xiaojiong¹, ZHANG Qi², SI Yong¹, HE Jin¹, LI Hui², YAN Xiaodong¹

1. Technology Center, Shanghai Tobacco Group Co., Ltd., Shanghai 201315, China;

2. Zhengzhou Tobacco Research Institute of CNTC, Zhengzhou 450001, China

Abstract: **[Objective]** To investigate the stress relaxation behavior and rheological properties of cut tobacco with different properties. **[Methods]** Cut tobacco with varied producing areas, stalk positions and cut widths, as well as medium-diameter cigarettes processed from such cut tobacco, were adopted as the research objects. The effects of cut tobacco properties and cigarette physical indicators on the stress relaxation performance of cut tobacco were analyzed by determining key parameters including stress relaxation time ratio, equilibrium stress and viscosity index, in combination with the rheological model for cut tobacco stress relaxation. **[Results]** The stress relaxation time ratio of lower cut tobacco was significantly lower than that of upper and middle cut tobacco, accompanied by greater equilibrium stress, indicating relatively superior rheological mechanical stability. Both the elasticity and filling capacity of cut tobacco reached the relatively optimum level at a cut width of 0.8 mm. Significant differences were observed in the stress relaxation performance of cut tobacco samples from different producing areas: Yunnan samples exhibited a higher stress relaxation time ratio and softer texture, whereas Henan samples possessed a lower stress relaxation time ratio and favorable elasticity. A strong correlation existed between equilibrium stress and corrected closed resistance, with a correlation coefficient of 0.81. **[Conclusion]** The stress relaxation performance of cut tobacco varies regularly with variations in producing area, stalk position and cut width. Compared with filling value, rheological parameters including equilibrium stress can more comprehensively characterize the mechanical properties of cut tobacco, which offers novel insights into the research on the correlation between tobacco processing and cigarette making.

Key words: cut tobacco; stress relaxation; rheology; equilibrium stress; cigarette physical indicator

[责任编辑: 王晓波 刘春奎]