



姚建武, 刘志昌, 刘雄斌, 等. 再造烟叶物理特性对加热卷烟烟丝及卷烟特性的影响研究[J]. 轻工学报, 2026, 41(5): 108-118.
Yao J W, Liu Z C, Liu X B, et al. Effects of physical properties of reconstituted tobacco sheets on cut filler and cigarette characteristics for heated tobacco products[J]. Journal of Light Industry, 2026, 41(5): 108-118.
DOI: 10.12187/2026.05.010

再造烟叶物理特性对加热卷烟烟丝及卷烟特性的影响研究

姚建武^{1,2,3}, 刘志昌^{1,2,3}, 刘雄斌^{1,2,3}, 胡念武^{1,2,3}, 陈一桢^{1,2,3}, 黄民慧⁴, 杨楠⁴

1. 中国烟草湖北中烟工业有限责任公司, 湖北 武汉 430040;
2. 湖北新业烟草薄片开发有限公司 技术中心, 湖北 武汉 430056;
3. 重组烟叶应用技术研究湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430056;
4. 湖北工业大学 生命科学与健康工程学院, 湖北 武汉 430068

摘要:【目的】探究不同加工工艺再造烟叶的物理特性, 并考查其与加热卷烟烟丝、卷烟特性间的内在关联。【方法】采用气相色谱、扫描电子显微镜表征稠浆法、辊压法和干法 3 种加工工艺再造烟叶的成分与微观结构, 利用质构仪测定其弹性模量、断裂强度、表面黏附力等物理特性, 结合灰色关联度与多元线性回归方法分析再造烟叶各物理特性与烟丝特性(整丝率、碎丝率、填充值)、卷烟特性(质量、圆周、吸阻、硬度)的关联性及其影响权重。【结果】3 种加工工艺再造烟叶的成分、微观结构及物理特性均存在显著差异; 干法再造烟叶结构蓬松多孔、纤维含量高、液态成分最低, 质构强韧; 辊压法再造烟叶结构致密、液态成分最高, 断裂伸长率高且不易断裂; 稠浆法再造烟叶结构与成分居中, 强度高但断裂伸长率低、易断裂。再造烟叶烟丝整丝率主要与物理特性中纵向拉伸断裂强度、横向剪切强度正相关, 影响权重约为 13.228%、11.338%; 填充值主要与纵向弹性模量、纵向拉伸断裂伸长率正相关, 影响权重约为 21.624%、12.231%; 卷烟特性主要与烟丝填充值和整丝率关联性较高。【结论】再造烟叶的纵向弹性模量、纵向拉伸断裂强度/伸长率等关键物理特性通过影响烟丝的填充值和整丝率, 进而影响卷烟的吸阻、质量、圆周等。

关键词: 加热卷烟; 再造烟叶; 质构特性; 烟丝特性; 卷烟特性; 灰色关联度分析

中图分类号: TS45 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-1553(2026)05-0108-11

0 引言

再造烟叶是加热不燃烧卷烟的主要原料, 其主要成分除烟草废弃物原料外, 还包含羧甲基纤维

素、海藻酸钠等胶黏剂, 针叶/阔叶木漂白硫酸盐浆等外加纤维, 丙三醇、1,2-丙二醇等雾化剂, 以及水、香精香料等^[1-2], 可通过造纸法、辊压法、稠浆法、干法等加工工艺制得, 再经切丝、卷制工艺制成

收稿日期: 2024-06-05; 修回日期: 2024-09-26; 出版日期: 2026-10-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(31571797); 湖北省自然科学基金杰出青年基金项目(2021CFA070); 湖北新业烟草薄片开发有限公司科技项目(2022JSZZ4BP2C014)

作者简介: 姚建武(1984—), 男, 湖北省武汉市人, 湖北中烟工业有限责任公司工程师, 主要研究方向为再造烟叶产品开发及工艺质量。E-mail: yaojw@hjl.hbtobacco.cn

通信作者: 杨楠(1980—), 女, 辽宁省海城市人, 湖北工业大学教授, 博士, 主要研究方向为食品物理。E-mail: nanyang@hbut.edu.cn

卷烟成品^[3]。经不同加工工艺生产的再造烟叶,其最终成分和物理结构存在显著差异,这会影响其整丝率、填充值等切丝特性,进而影响卷烟产品的卷制品质^[4-5]。陈思瑶等^[6-7]研究发现,外加纤维的种类、用量及形态特征均会影响再造烟叶的剪切强度、柔软度等特性,进而影响切丝性能;李朝建等^[5]研究发现,再造烟叶的黏性/黏附力与含水量呈正相关;而朱波等^[8]研究发现,烟丝硬度显著依赖再造烟叶的水分含量,进而影响卷制效果。此外,由再造烟叶制成的卷烟产品的抽吸品质不仅与其化学成分有关,还受其物理特性的影响,如切丝长度、宽度、并条、打结程度等因素均会影响卷烟的传热过程及烟气释放行为,进而影响抽吸品质^[9-10]。

再造烟叶切丝过程是其在外力作用下发生形变直至断裂的过程,其体相和表面力学特性对切丝效果都存在显著影响。因此,在分析加热卷烟再造烟叶体相和表面力学特性基础上,可进一步分析其成分和微观结构及其与烟丝特性、卷烟特性之间的关联性。席年生等^[11]通过研究不同产地再造烟叶的剪切力、抗张强度及弹性,发现适当的烟叶厚度利于切丝,烟叶的外形尺寸和抗张强度过大易造成切丝及卷制质量波动;还有研究发现,烟草原料硬度会影响其弹性,进而影响制丝效果。但目前并未明晰这些物理特性参数与烟丝性能之间的关联性。

鉴于此,本研究拟利用质构分析仪等对稠浆法、辊压法和干法3种工艺再造烟叶的弹性、断裂强度、摩擦学特性、表面黏附特性等物理特性进行表征,并利用灰色关联度和多元线性回归方法探讨3种工艺再造烟叶物理特性与烟丝特性、卷烟特性之间的关联性,以期为加热卷烟再造烟叶的工艺优化和卷烟质量提升提供参考。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

稠浆法再造烟叶薄片样品4个(主要在外加纤维(针叶木浆)、水分、雾化剂含量上存在差异),辊压法再造烟叶薄片样品3个(主要在烟草原料、外加纤维(针叶木浆)、胶黏剂含量上存在差异),干法再造烟叶薄片样品1个(外加纤维为绒毛纤)及其

烟丝样品,由湖北某薄片公司提供;卷烟样品,由湖北某卷烟厂提供。

制丝的必要参数:相对湿度(40.0±5.0)%;温度(23.0±3.0)℃;定量喂料物料流量(1500±15) kg/h;加香比例0.8%,加香累计精度≤0.5%。

卷接的必要参数:相对湿度(40.0±5.0)%;温度(23.0±3.0)℃;VE正压(0.8~1.2) kPa,VE负压(7.5~8.5) kPa;SE烙铁温度(180±20)℃,搓板温度(185±20)℃,水松纸加热温度(75±10)℃。

1.2 主要仪器与设备

Agilent 8860 型气相色谱(GC)仪,美国 Agilent 公司;AMETEK TA1 型质构分析仪,美国 AMETEK 公司;JSM-6390 LV 型扫描电子显微镜(SEM),日本 JEOL 公司;KBF 240 型恒温恒湿箱,上海宾德环境试验设备有限公司;YQ-2 型烟丝振动分选筛,郑州嘉德机电科技有限公司;YDZ 430 型烟丝填充值测定仪,中国烟草总公司郑州烟草研究院;S16502 型厚度仪,德国 FRANK-PTI 公司;ME104E 型分析天平,瑞士梅特勒-托利多国际有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 成分与微观结构检测 成分检测:将再造烟叶薄片剪成约 30 mm×1 mm 丝状,在温度为 23℃、相对湿度为 40%条件下放置 10 h 达到平衡,再利用 GC 仪测定其水分、丙三醇和 1,2-丙二醇质量分数。

微观结构表征:将再造烟叶薄片剪成合适大小,用导电胶粘贴于 SEM 样品台上,喷涂金导电薄层后放入 SEM 样品室中,观察不同工艺再造烟叶样品表面及切面形貌。

1.3.2 厚度与定量检测 厚度检测:参照文献[12]要求平衡待测样品水分,随机抽取 10 片平衡好的待测样品,参照文献[13]测定样品厚度,结果为 10 次测量的平均值,以 mm 表示。

定量检测:从再造烟叶薄片切取 100 mm×100 mm 的正方形或面积为 100 cm² 的圆形试样 20 片,每 5 片为 1 组,用天平分别称重。

1.3.3 物理特性指标检测 将再造烟叶薄片在温度 23℃、相对湿度 40%条件下平衡 10 h 以上,利用质构分析仪在同一环境条件下测定物理特性指标。

拉伸实验:将再造烟叶薄片裁剪成长条状,使用固定夹具将其上、下垂直固定,上、下两夹具中心线与试样受力方向平行,在受力过程中保持试样在同一平面。通过拉伸断裂强度平均值及误差,确定3种工艺再造烟叶拉伸力学检测方法的最优条件^[14]为:样品宽度 15 mm、样品夹距 100 mm、拉伸速度 1.5 mm/s。利用上述最优条件,分析再造烟叶拉伸全过程受力,获得再造烟叶在拉伸过程中的应力(σ)-应变(ε)曲线,计算再造烟叶样品在拉伸过程中横向及纵向的弹性模量(E)、屈服应力(σ_y)、断裂强度(σ_R)和断裂伸长率(ε_R)。 E 指单位面积上再造烟叶受力与其线性相对形变的比值,反映其坚韧性能。 σ_y 指再造烟叶样品发生塑性形变的应力,反映其易形变程度及脆度。 σ_R 指单位面积的再造烟叶样品在拉伸断裂之前能承受的最大应力。 ε_R 指再造烟叶拉伸伸长达极限时,其伸长度与其原长的比值,可在一定程度上反映其弹性性能和强度。横向是指垂直于纤维走向的方向,纵向是指平行于纤维走向的方向。

剪切实验:使用质构分析仪固定夹具将条状再造烟叶薄片左右固定,受力过程中保持试样在同一平面。利用宽度为 60 mm 的刀片探头,分别对样品进行横向和纵向剪切测试,通过剪切强度(剪切断裂之前单位宽度样品能承受的最大力)平均值及误差确定最优测试参数为:样品宽度 15 mm、样品夹距 20 mm、拉伸速度 20 mm/s。

表面黏附力测试:将再造烟叶薄片裁剪成不同边长的正方形,水平固定在质构分析仪基底表面,利用平板探头,以一定速度对再造烟叶做挤压-拉离实验,实验过程中所需最大力记为黏附力。通过黏附力平均值及误差^[15-16]确定最优测试参数为:稠浆法和辊压法,样品边长 50 mm、挤压时间 30 s、感压力 5 N、上拉速度 20 mm/s;干法,样品边长 50 mm、挤压时间 30 s、感压力 15 N、上拉速度 15 mm/s。

表面摩擦系数测试:将再造烟叶薄片裁剪成宽度不少于 60 mm、长度不少于 120 mm 的长方形和 60 mm×60 mm 的正方形,分别固定在质构分析仪摩擦检测样品台和滑块底部,施加水平牵引力使滑块相对于样品台匀速运动,在滑动过程中保持滑块不

倾斜,分别测量横-横、横-纵、纵-纵动摩擦系数^[17]。横-横方向指再造烟叶相对滑动的上、下表面均为垂直于纤维走向的方向;横-纵方向指上表面为垂直于纤维走向、下表面为平行于纤维走向的方向;纵-纵方向指上下两个表面均为平行于纤维走向的方向。通过动摩擦系数平均值及误差^[17]确定的最优测试参数为:稠浆法,滑块质量 300 g,滑行速度 15 mm/s;辊压法,滑块质量 300 g,滑行速度 10 mm/s;干法,滑块质量 200 g,滑行速度 10 mm/s。

1.3.4 烟丝与卷烟特性指标检测 参照文献[18-23]的方法,分别对烟丝与卷烟的填充值、整丝率和碎丝率,以及卷烟圆周、质量、吸阻和硬度进行测定。

1.3.5 关联性分析方法 灰色关联度分析是根据因素之间发展趋势的相似或相异程度,衡量因素间关联度的方法,计算公式如下:

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |y(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |y(k) - x_i(k)|}{|y(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |y(k) - x_i(k)|}$$

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k)$$

式中, $y(k)$ 为反映系统行为特征的参考数列, $x_i(k)$ 为与之进行关联的第*i*列比较数列, $\xi_i(k)$ 为 $y(k)$ 与 $x_i(k)$ 之间的关联系数,关联系数的平均值即为关联度 r_i 。一般关联度高于 70% 为重要因素,处于 50%~70% 之间为比较重要因素,其余为不重要因素。灰色关联度分析法可用于分析不同加工工艺再造烟叶成分、物理特性与烟丝品质间的关联性,确定各参数间的联系是否紧密^[24]。

多元线性回归方法是用于研究一个因变量与两个或两个以上自变量的相关关系,可揭示一种现象或事物的数量随多种影响因素变动而变动的规律,并据此建立多变量之间线性或非线性数学模型的统计方法。回归方程如下:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_k x_k$$

式中, $x_1, x_2, \cdots, x_k$ 为*k*个自变量; β_0 为常数, $\beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_k$ 为*k*个自变量的回归系数。

由灰色关联度得到关联系数排序,从中选择重要相关参数,再通过线性回归给出各参数权重。由于涉及多个变量,借助 SPSS statistics 29.0 统计软件

进行分析。

2 结果与分析

2.1 再造烟叶成分和微观结构分析

3 种加工工艺再造烟叶各成分的平衡质量分数见表 1。由表 1 可知,干法再造烟叶水分质量分数相对较低,其余两种工艺再造烟叶水分质量分数均在 9%左右,其中辊压法再造烟叶样品 1 和样品 3 略高。辊压法再造烟叶的甘油平均质量分数均高于稠浆法和干法。再造烟叶的 1,2-丙二醇质量分数均远低于水分和甘油,稠浆法再造烟叶的 1,2-丙二醇质量分数高于辊压法,干法再造烟叶的 1,2-丙二醇质量分数极低,未检测到。

3 种加工工艺再造烟叶的 SEM 图如图 1 所示,其中 a、d 和 g 为再造烟叶表面,b、e 和 h 为与再造烟叶纤维走向垂直的切截面,c、f 和 i 为与再造烟叶纤维走向平行的切截面,a—c 为干法,d—f 为辊压法,g—i 为稠浆法。由图 1 可知,干法再造烟叶整体较为蓬松,表面不平整,多孔且孔径较大,其中可见大量纤维;切截面结构松散,纤维数量较多,其中纤

维走向随机,交错形成网状。辊压法再造烟叶表面较为平整,截面结构紧密,孔隙较小,可见少量较细小纤维。稠浆法再造烟叶表面较为平整,但存在较小孔隙,截面结构比辊压法再造烟叶松散,但比干法再造烟叶致密,含有一定量纤维,并有大量中空存在。

表 1 3 种加工工艺再造烟叶各成分的平衡质量分数

Table 1 Equilibrium mass fractions of components in reconstituted tobacco sheets produced by three processing techniques					%
加工工艺	样品编号	水分质量分数	甘油质量分数	1,2-丙二醇质量分数	
辊压法	1	9.48+0.09	18.68+0.44	0.53+0.02	
	2	8.92+0.02	15.22+0.12	1.83+0.01	
	3	9.59+0.22	19.00+0.73	0.81+0.04	
	平均值	9.33±0.29	17.63±1.71	1.06±0.56	
干法	4	7.99+0.41	8.81+0.23	\	
	5	9.03+0.06	11.48+0.12	2.33+0.02	
	6	9.17+0.11	12.74+0.26	2.45+0.18	
	7	9.08+0.09	16.74+0.28	0.47+0.03	
稠浆法	8	9.07+0.07	12.83+0.11	2.15+0.13	
	平均值	9.09±0.05	13.45±1.97	1.85±0.80	

注:\表示未检测出,下同。

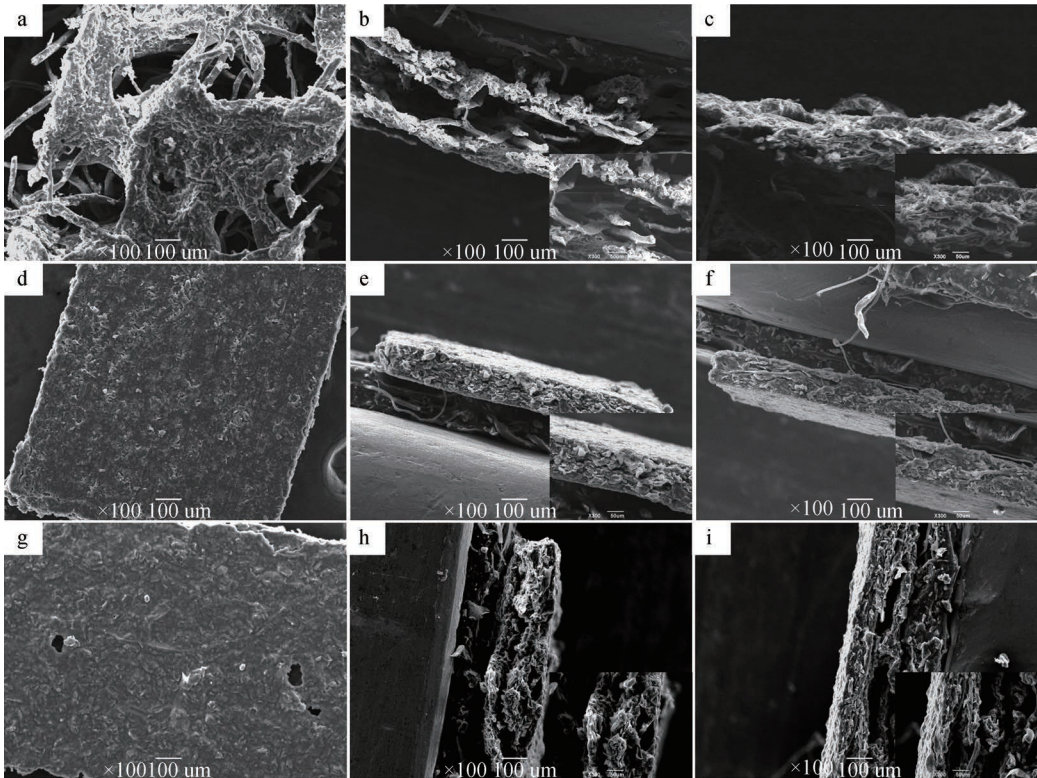


图 1 3 种加工工艺再造烟叶的 SEM 图

Fig. 1 SEM images of reconstituted tobacco sheets produced by three processing techniques

2.2 再造烟叶物理特性分析

3 种加工工艺再造烟叶横向和纵向拉伸过程中的代表性应力-应变曲线如图 2 所示。由图 2 可知, 3 种加工工艺再造烟叶横向和纵向拉伸应力-应变曲线均呈先快速上升, 后上升速度减缓, 达到某一峰值后迅速降低, 对应再造烟叶从弹性形变到塑性形变, 再到结构断裂的过程。但不同加工工艺再造烟叶具体参数之间存在明显差异, 对于横向拉伸, 辊压法再造烟叶产生相同应变需要的应力整体更小; 如应变 2% 时, 辊压法再造烟叶应力仅为 0.5 kN/m^2 , 而其他两种再造烟叶应力为 $1.2\sim 2.5\text{ kN/m}^2$, 且在较大应变 7.8% 左右才发生断裂, 说明其更不易断裂。干法再造烟叶在较大应变 10.2% 左右才发生断裂, 而稠浆法在 2.5% 左右发生断裂。对于纵向拉伸, 整体应力均大于横向拉伸相同应变下的应力, 说明再造烟叶在沿着纤维走向方向更难被拉伸至断裂, 这种差异在稠浆法和辊压法再造烟叶中更明显, 且稠浆法再造烟叶纵向拉伸应力最高。干法再造烟叶的横向和纵向应力应变差异较小, 与其纤维方向无规则排列有关。3 种加工工艺再造烟叶横向拉伸过程中发生塑性形变, 小范围结构破裂, 形变不可恢复, 对应为横向拉伸的屈服应力点 (图 2a) 中 Y

点; 辊压法再造烟叶纵向也存在屈服应力点, 而干法和稠浆法再造烟叶纵向无屈服应力点。稠浆法再造烟叶纵向、横向剪切强度-探头位移曲线如图 3 所示。由图 3 可知, 横向和纵向差异不大, 且无屈服应力点。此外, 由于剪切实验中不能测量样品形变, 不能计算剪切弹性模量和伸长率, 因此剪切测试只给出剪切强度值。

再造烟叶体相和表面物理特性指标分别见表 2 和表 3。由表 2 和表 3 可知, 辊压法再造烟叶的横向/纵向弹性模量、屈服应力、断裂强度均比其他两种再造烟叶低, 但断裂伸长率较高, 说明辊压法再造烟叶不易断裂, 与应力-应变曲线结果一致。稠浆法再造烟叶横向各物理特性指标均高于辊压法再造烟叶, 且纵向拉伸断裂强度最大, 但横向/纵向断裂伸长率较低, 说明稠浆法虽纵向拉伸断裂强度大, 但易断裂。干法再造烟叶的横向/纵向断裂强度和伸长率均最高, 是稠浆法再造烟叶的 3 倍以上, 说明其拉伸断裂强度较大, 延展性较好, 不易断裂, 即最强韧。3 种再造烟叶纵向拉伸断裂强度均普遍高于横向拉伸断裂强度, 说明其与纤维走向有关。但干法再造烟叶横向和纵向拉伸及剪切强度差异不大, 可能是由于其纤维是网状分布的, 无方向性。

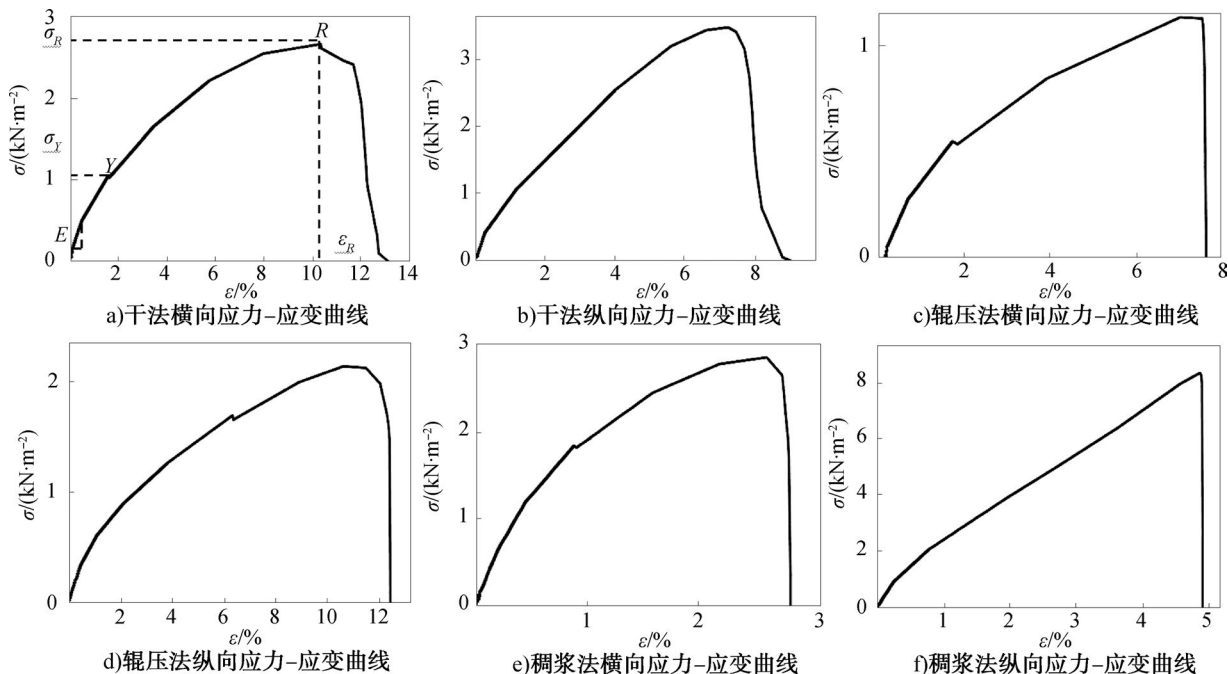


图 2 3 种加工工艺再造烟叶横向和纵向拉伸过程中的代表性应力-应变曲线
Fig. 2 Representative stress-strain curves during transverse and longitudinal stretching of reconstituted tobacco sheets produced by three processes

辊压法再造烟叶黏附力较高,干法再造烟叶黏附力最低,稠浆法介于二者之间。辊压法再造烟叶黏附力较高,可能与总液体物质,尤其是甘油质量分数较高有关(见表1)。液体物质越多,越容易溢出,而甘油质量分数越高,表面溢出液体的黏度越大,因

此黏附力较高。干法再造烟叶水分和甘油质量分数均最低,其黏附力在3种再造烟叶中最低。辊压法再造烟叶的横-纵和纵-纵动摩擦系数均最高,干法再造烟叶横-横动摩擦系数最高。表面动摩擦系数与粗糙度和化学特性有关。辊压法再造烟叶的

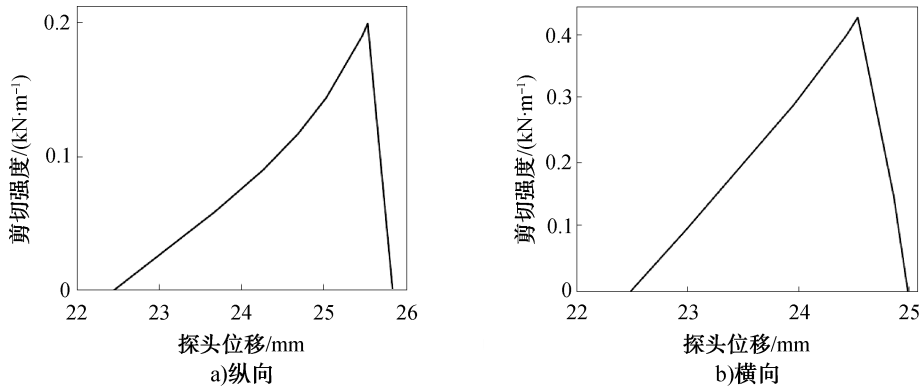


图3 稠浆法再造烟叶纵向、横向剪切强度-探头位移曲线

Fig. 3 Shear strength-probe displacement curves in the longitudinal and transverse directions for a representative reconstituted tobacco sheet produced by the slurry process

表2 再造烟叶体相物理特性指标

Table 2 Bulk physical properties of reconstituted tobacco sheets produced by different processes													
样品 编号	拉伸物理特性								剪切物理特性		薄片特性		
	横向				纵向				纵向	横向	厚度/mm	定量/ (g·m ⁻²)	
	弹性模量/ (kN·m ⁻²)	屈服应力/ (kN·m ⁻²)	断裂强度/ (kN·m ⁻²)	断裂伸长 率/%	弹性模量/ (kN·m ⁻²)	屈服应力/ (kN·m ⁻²)	断裂强度/ (kN·m ⁻²)	断裂伸长 率/%	剪切强度/ (kN·m ⁻²)	剪切强度/ (kN·m ⁻²)			
1	0.56±0.11	0.73±0.07	0.99±0.08	5.45±1.12	0.65±0.12	1.58±0.16	1.93±0.16	8.91±0.89	0.11±0.02	0.25±0.02	0.179±0.018	194.3±22.1	
2	0.49±0.07	0.65±0.09	1.03±0.11	6.77±0.64	0.69±0.13	1.89±0.23	2.35±0.12	10.82±0.88	0.14±0.02	0.30±0.03	0.176±0.016	187.6±23.6	
3	0.73±0.19	0.87±0.18	1.19±0.22	3.74±0.31	1.05±0.18	1.09±0.20	1.67±0.17	5.28±0.36	0.11±0.02	0.24±0.03	0.180±0.014	198.2±19.2	
平均值	0.59±0.10	0.75±0.09	1.07±0.09	5.32±1.24	0.80±0.18	1.52±0.33	1.98±0.28	8.34±2.29	0.12±0.01	0.26±0.02	0.178±0.002	193.4±5.4	
4	0.86±0.11	1.31±0.19	2.43±0.35	10.00±1.55	1.14±0.22	\	3.79±0.63	8.71±1.46	0.55±0.06	0.73±0.05	0.319±0.042	129.6±10.1	
5	1.20±0.15	1.06±0.12	1.58±0.11	3.94±0.29	3.03±0.31	\	7.66±0.35	4.27±0.22	0.22±0.03	0.58±0.05	0.211±0.015	195.6±16.0	
6	2.54±0.28	1.95±0.22	2.86±0.26	3.12±0.40	3.95±0.36	\	8.96±0.42	4.81±0.15	0.19±0.02	0.47±0.04	0.204±0.012	185.6±13.1	
7	1.52±0.16	1.44±0.23	2.03±0.07	3.27±0.38	2.93±0.33	\	8.52±0.48	4.61±0.14	0.26±0.03	0.54±0.04	0.216±0.013	182.7±13.0	
8	1.05±0.17	1.01±0.17	1.58±0.08	4.32±0.33	2.40±0.49	\	7.69±0.43	4.75±0.28	0.20±0.04	0.47±0.04	0.214±0.014	201.0±16.9	
平均值	1.58±0.58	1.36±0.38	2.01±0.52	3.66±0.49	3.07±0.56	\	8.21±0.56	4.61±0.21	0.22±0.03	0.51±0.05	0.211±0.004	191.2±7.4	

表3 再造烟叶表面物理特性指标

Table 3 Surface physical properties of reconstituted tobacco sheets						
加工工艺	样品 编号	黏附力/N	摩擦系数			
			横-横 动摩擦系数	横-纵 动摩擦系数	纵-纵 动摩擦系数	
辊压法	1	2.56±0.32	0.44±0.13	0.54±0.12	0.57±0.11	
	2	2.27±0.26	0.66±0.13	0.59±0.09	0.74±0.11	
	3	1.21±0.28	0.47±0.08	0.54±0.11	0.64±0.16	
	平均值	2.01±0.58	0.52±0.10	0.56±0.02	0.65±0.07	
干法	4	0.54±0.08	0.78±0.13	0.37±0.08	0.62±0.07	
稠浆法	5	0.69±0.07	0.56±0.11	0.45±0.15	0.53±0.08	
	6	0.70±0.10	0.55±0.06	0.54±0.05	0.46±0.10	
	7	0.90±0.06	0.37±0.04	0.45±0.08	0.44±0.08	
	8	0.45±0.06	0.43±0.08	0.40±0.04	0.45±0.04	
	平均值	0.69±0.16	0.48±0.08	0.46±0.05	0.47±0.04	

甘油质量分数高,表面黏附性高,导致摩擦系数较高,而干法再造烟叶虽表面黏附力低,但其表面多孔,且纤维分布杂乱无规,导致其表面粗糙度较大,摩擦系数较高。辊压法再造烟叶厚度最小,定量最高,可能与其表面平整、结构致密和液态物质含量较高有关;干法再造烟叶厚度最高,定量最低,可能与其由大量纤维形成的粗糙多孔结构有关;而稠浆法再造烟叶厚度和定量均居中,可能与其纤维含量介于干法与辊压法之间有关。

2.3 再造烟叶烟丝和卷烟特性分析

3 种加工工艺再造烟叶烟丝与卷烟特性指标见表 4。由表 4 可知,干法再造烟叶填充值和整丝率都最高,可能与其较强的纤维网络有关,同时碎丝率也较高,主要是由水分、雾化剂等液体成分含量过低,易产生干碎屑所致;稠浆法再造烟叶填充值高于辊压法再造烟叶,而整丝率低于辊压法再造烟叶,碎丝率相反,这可能与辊压法再造烟叶物理特性有关,如稠浆法弹性较高但断裂伸长率较低。制成成品卷烟后,辊压法和稠浆法再造烟叶的烟丝吸阻有一定波动,但平均值接近;质量和圆周没有明显差异;硬度有一定差异,辊压法再造烟叶所制烟支的硬度比稠浆法更大,同一工艺下不同样品的硬度也有一定波动。

2.4 再造烟叶物理特性与烟丝特性关联性分析

再造烟叶物理特性与烟丝特性关联度见表 5。由表 5 可知,烟丝特性主要与再造烟叶的厚度、定量、横向拉伸屈服应力、横向拉伸断裂强度/伸长率、纵向/横向剪切强度、各方向摩擦系数的关联系

数大部分在 0.7 以上,说明与这些物理特性关联性较高。再造烟叶物理特性对烟丝特性影响权重见表 6。由表 6 可知,烟丝特性中,整丝率主要与纵向拉伸断裂强度/伸长率、横向剪切强度正相关,且其与纵向拉伸断裂强度、横向剪切强度相关性最大,影响权重分别为 13.228%、11.338%,与横向屈服应力、横-横动摩擦系数负相关;碎丝率主要与纵向弹性模量、纵向剪切强度、纵向拉伸断裂伸长率负相关,与黏附力、横向拉伸断裂强度、厚度正相关;填充值主要与纵向弹性模量、纵向拉伸断裂伸长率、纵向剪切强度及厚度正相关,且其与纵向弹性模量、纵向拉伸断裂伸长率相关性最大,影响权重分别为 21.624%、12.231%,而与横向拉伸断裂强度/伸长率、横-横动摩擦系数、定量负相关。对于整丝率(碎丝率),上述结果说明再造烟叶在沿纤维方向的纵向强度越高、越强韧,烟丝越容易保持完整不碎,整丝率越高,反之碎丝率高;而摩擦系数、黏附性高可能引起整丝率下降、碎丝率增高;厚度增高会引起碎丝率增加,这是由于所选的 8 个样品再造烟叶的制备工艺不同,导致其微观结构存在差异,因此即使有的烟叶强度较高,但烟丝脆性大(如辊压法再造烟叶),易造成折断,使烟丝碎丝率上升。烟丝填充值主要与纵向弹性模量、纵向拉伸断裂强度/伸长率及厚度正相关,上述结果说明具有一定厚度、弹性和强度较高的烟丝,给其施压后会导致其体积增大,填充值增高。虽然表 5 数据显示厚度和定量与烟丝特性具有高度相关性,但回归分析发

表 4 3 种加工工艺再造烟叶烟丝和卷烟特性指标

Table 4 Cut filler and cigarette properties of reconstituted tobacco sheets produced by three processing techniques

加工方法	样品编号	烟丝特性			卷烟特性			
		填充值/(m ³ ·g ⁻¹)	整丝率/%	碎丝率/%	吸阻/kPa	质量/g	圆周/mm	硬度/%
辊压法	1	2.90±0.39	95.85±0.15	0.35±0.05	0.41±0.02	0.61±0.01	22.45±0.04	78.18±2.80
	2	2.88±0.16	94.50±1.61	0.27±0.05	0.39±0.03	0.59±0.02	22.47±0.02	69.34±8.54
	3	2.90±0.32	94.55±0.35	0.20±0.00	0.49±0.03	0.59±0.01	22.51±0.06	72.84±2.91
	平均值	2.89±0.01	94.97±0.62	0.27±0.06	0.43±0.04	0.60±0.01	22.47±0.03	73.45±3.33
干法	4	5.80±0.46	95.70±1.70	0.85±0.15	—	—	—	—
	5	3.33±0.17	93.05±0.65	0.25±0.05	0.42±0.01	0.61±0.01	22.41±0.04	72.32±4.04
	6	3.20±0.37	88.25±0.25	0.45±0.05	0.44±0.01	0.59±0.005	22.40±0.02	68.86±4.37
稠浆法	7	3.43±0.28	92.10±0.20	0.30±0.10	0.47±0.04	0.59±0.01	22.47±0.06	68.86±4.46
	8	3.45±0.26	92.60±0.50	0.35±0.05	0.40±0.04	0.61±0.01	22.48±0.09	78.95±2.04
	平均值	3.35±0.10	91.50±1.91	0.34±0.07	0.43±0.02	0.60±0.01	22.44±0.04	72.25±4.76

注:—表示未进行卷烟指标测定。

现其所占权重不大,它们可能是通过影响再造烟叶其他物理特性而间接影响烟丝特性。

2.5 再造烟叶烟丝特性与卷烟特性关联性分析

再造烟叶烟丝特性与卷烟特性关联度见表7。由表7可知,卷烟吸阻和硬度与烟丝填充值关联度较高,在烟丝质量相近的情况下,填充值越高的烟

丝,卷烟中空隙越少,硬度越高,气体流动越困难,吸阻越大^[25-26]。卷烟质量和圆周与烟丝整丝率关联度较高。整丝率较高时,卷烟端部落丝相对较少,质量提升;烟丝质量相近时,整丝率较高,会使烟丝长度增长,圆周增加^[27-28]。卷烟特性主要与烟丝特性中填充值和整丝率关联性较高,而填充值和

表5 再造烟叶物理特性与烟丝特性关联度

Table 5 Grey relational degree between physical properties and cut filler characteristics of reconstituted tobacco sheets

物理特性		填充值/($\text{m}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	整丝率	碎丝率	
拉伸	横向	弹性模量	0.58±0.16 ¹¹	0.58±0.13 ¹¹	0.63±0.26 ¹⁰
		屈服应力	0.72±0.13 ⁷	0.70±0.09 ⁷	0.67±0.15 ⁹
		断裂强度	0.77±0.06 ⁵	0.66±0.12 ⁸	0.76±0.17 ⁴
		断裂伸长率	0.78±0.06 ⁴	0.59±0.12 ¹⁰	0.81±0.06 ²
	纵向	弹性模量	0.49±0.14 ¹⁴	0.47±0.10 ¹⁵	0.56±0.25 ¹¹
		断裂强度	0.51±0.12 ¹³	0.51±0.15 ¹²	0.56±0.21 ¹²
断裂伸长率		0.67±0.07 ⁹	0.70±0.08 ⁶	0.69±0.19 ⁸	
剪切	横向剪切强度	0.68±0.11 ⁸	0.49±0.14 ¹³	0.89±0.08 ¹	
	纵向剪切强度	0.83±0.11 ³	0.66±0.20 ⁹	0.79±0.08 ³	
表面	黏附力	0.49±0.18 ¹⁵	0.48±0.10 ¹⁴	0.55±0.28 ¹³	
	横-横动摩擦系数	0.85±0.07 ²	0.73±0.08 ⁵⁴	0.73±0.11 ⁶	
	横-纵动摩擦系数	0.59±0.13 ¹⁰	0.80±0.14 ¹	0.74±0.17 ¹⁴	
	纵-纵动摩擦系数	0.74±0.15 ⁶	0.78±0.13 ²	0.73±0.18 ⁷	
薄片特性	厚度	0.90±0.03 ¹	0.72±0.13 ⁵	0.79±0.12 ⁵	
	定量	0.57±0.08 ¹²	0.76±0.08 ³	0.73±0.16 ¹⁵	

注:数据上标表示依据灰色关联度分析结果,将关联度按照从大到小排序。

表6 再造烟叶物理特性对烟丝特性影响权重
Table 6 Influence weights of physical properties on cut filler characteristics of reconstituted tobacco sheets

物理特性	整丝率影响权重/%	碎丝率影响权重/%	填充值影响权重/%
横向弹性模量	-3.322	-3.858	-0.424
横向拉伸屈服应力	-14.325	3.827	-4.697
横向拉伸断裂强度	-3.596	9.787	-10.959
横向拉伸断裂伸长率	3.139	4.203	-10.796
纵向弹性模量	-5.395	-15.151	21.624
纵向拉伸断裂强度	13.228	-0.502	2.642
纵向拉伸断裂伸长率	9.265	-6.462	12.231
纵向剪切强度	4.938	-12.453	8.252
横向剪切强度	11.338	-4.987	0.098
黏附力	-2.073	14.429	-1.272
横-横动摩擦系数	-10.667	6.807	-11.546
横-纵动摩擦系数	-8.351	2.635	0.913
纵-纵动摩擦系数	2.164	-6.054	4.403
厚度	3.078	8.783	5.577
定量	-5.120	0.063	-4.566

表7 再造烟叶烟丝特性与卷烟特性关联度
Table 7 Grey relational degree between cut filler properties and cigarette properties of reconstituted tobacco sheets

卷烟特性	填充值/(m ³ ·g ⁻¹)	整丝率	碎丝率
吸阻	0.83±0.18	0.77±0.07	0.57±0.16
质量	0.79±0.07	0.94±0.04	0.61±0.19
圆周	0.77±0.07	0.94±0.05	0.58±0.17
硬度	0.82±0.12	0.89±0.09	0.67±0.21

整丝率主要与纵向弹性模量、纵向拉伸断裂强度/伸长率等正相关,而与横向拉伸断裂强度/伸长率、横向屈服应力等指标负相关(见表6)。因此,横向拉伸指标越高,可能导致填充值和整丝率越低。以不同工艺为例,稠浆法横向拉伸断裂强度较高,以稠浆法烟丝为主进行卷制时,应搭配一定比例横向拉伸断裂强度较低的辊压法烟丝,以平衡整体性能,提升卷烟品质。

3 结论

本研究探讨了不同工艺再造烟叶物理特性与其烟丝特性及卷烟特性之间的关联性。研究发现3种加工工艺再造烟叶的成分、微观结构和物理特性都存在明显差异:干法再造烟叶结构最松散,纤维含量最高,水分含量最低;辊压法再造烟叶结构最致密,水分和甘油含量最高;稠浆法再造烟叶结构居中,水分和甘油含量适中,纤维较多。除了断裂伸长率,稠浆法再造烟叶各物理特性指标均高于辊压法再造烟叶,说明其强度高,易断裂,与其结构中含有一定量纤维,填充较松散有关;辊压法再造烟叶各物理特性指标较低但断裂伸长率较高,说明其不易断裂,与其液体成分含量较高、纤维含量少但较细小、结构填充紧密有关;干法再造烟叶各物理特性指标均较高,说明其非常强韧,与其纤维含量高,且呈无规则疏松网状结构有关。再造烟叶的烟丝特性中,整丝率主要与物理特性中纵向拉伸断裂强度、横向剪切强度正相关,影响权重占比为13.228%、11.338%;填充值主要与纵向弹性模量、纵向拉伸断裂伸长率正相关,影响权重占比为21.624%、12.231%;再造烟叶的厚度和定量虽与烟丝特性相关性较高,但影响权重并不高,可能是通过影响其他物理特性间接影响烟丝特性。卷烟特性主要与烟丝填充值和整丝率相关。综上,再造烟叶的纵向拉伸断裂强度、横向剪切强度及纵向弹性模量是影响成丝品质的关键因素,其通过影响烟丝特性中烟丝填充值和整丝率进一步影响成品卷烟的品质。因此,在未来卷烟生产中可通过改变烟叶物理特性等,实现再造烟叶从原料特性到最终卷烟品质的协同优化,为加热卷烟产品的高质量开发提供参考。

参考文献:

- [1] 闫瑛,田洪源,孙志涛,等.造纸法加热不燃烧烟草薄片浆料级分分布研究及其对产品性能的影响[J].中国造纸,2025,44(7):154-163.
Yan Y, Tian Y Y, Sun Z T, et al. Pulp screening distribution and its effects on performance of heat-not-burn papermaking processed reconstituted tobacco [J].

- China Pulp & Paper, 2025, 44(7):154-163.
- [2] 张文军,吴建霖,陈宇超,等.国内加热烟草芯材制备工艺技术研究进展[J].中国造纸,2024,43(3):126-134.
Zhang W J, Wu J L, Chen Y C, et al. Research progress of domestic heated tobacco core material preparation technology [J]. China Pulp & Paper, 2024, 43(3):126-134.
- [3] 张金磊,秦云华,杨柳,等.造纸法再造烟叶品质提升技术研究进展[J].安徽农学通报,2023,29(5):116-121.
Zhang J L, Qin Y H, Yang L, et al. Research progress on the technology of improving the quality of paper-making reconstituted tobacco [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2023, 29(5):116-121.
- [4] 陈铁贤,李晓平,薛冬,等.烟草薄片涂布液的化学组分对其感官质量的影响研究进展[J].中国造纸学报,2024,39(1):66-73.
Chen Y X, Li X P, Xue D, et al. Research progress of effects of chemical components of reconstituted tobacco sheet coatings on sensory quality [J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2024, 39(1):66-73.
- [5] 李朝建,杨扬,尤晓娟,等.无机填料对稠浆法烟草薄片吸湿性能影响研究[J].中国造纸,2025,44(5):145-150.
Li C J, Yang Y, You X J, et al. Study on moisture absorption characteristics of the influence of inorganic fillers on reconstituted tobacco sheet prepared by thick pulp method [J]. China Pulp & Paper, 2025, 44(5):145-150.
- [6] 陈思瑶,肖玉英,储生泽,等.4种松科木材的纤维形态及理化性能研究[J].中国造纸,2025,44(11):37-43.
Chen S Y, Xiao Y Y, Chu S Z, et al. Study on fiber morphology and physicochemical properties of four Pinaceae wood species [J]. China Pulp & Paper, 2025, 44(11):37-43.
- [7] 姚建武,李盼,喻世涛,等.稠浆法烟草薄片主要成分对其物理特性的影响[J].中国造纸学报,2025,40(4):166-176.
Yao J W, Li P, Yu S T, et al. Effects of main component on the physical properties of reconstituted tobacco sheets prepared by thick slurry process [J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2025, 40(4):166-176.
- [8] 朱波,陈智鸣,张旭升,等.烟丝形态调控对中支卷烟卷制质量及稳定性的影响[J].烟草科技,2022,55(7):66-72.
Zhu B, Chen Z M, Zhang X S, et al. Effects of modifying morphology of cut tobacco strands on quality and consistency of demi-slim cigarettes [J]. Tobacco Science & Technology, 2022, 55(7):66-72.
- [9] 柴武君,郑闪闪,游金清,等.烟丝结构对中支卷烟的燃烧特性及烟气香味成分的影响[J].轻工学报,2025,40(3):104-114.
Chai W J, Zheng S S, You J Q, et al. Effects of cut tobacco structure on combustion characteristics and smoke aroma

components of medium-sized cigarettes [J]. Journal of Light Industry, 2025, 40(3): 104-114.

[10] 杨扬, 李朝建, 周成喜, 等. 烟粉粒径及其分布对稠浆法烟芯薄片性能的影响[J]. 中国造纸, 2024, 43(1): 66-73.

Yang Y, Li C J, Zhou C X, et al. Effect of tobacco powder particle size and its distribution on properties of slurry-type reconstituted tobacco leaf [J]. China Pulp & Paper, 2024, 43(1): 66-73.

[11] 席年生, 邓国栋, 宋伟民, 等. 再造烟叶物理特性及其对切丝与卷制效果的影响[J]. 烟草科技, 2014, 47(4): 15-19.

Xi N S, Deng G D, Song W M, et al. Physical characteristics of different reconstituted tobacco and their influences on tobacco cutting and cigarette making [J]. Tobacco Science & Technology, 2014, 47(4): 15-19.

[12] GB/T 16447—2004 烟草及烟草制品 调节和测试的大气环境[S].

GB/T 16447—2004 Tobacco and tobacco products—Atmosphere for conditioning and testing[S].

[13] GB/T 451.3—2002 纸和纸板厚度的测定[S].

GB/T 451.3—2002 Paper and board—Determination of thickness [S].

[14] 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 X, Chen K B, Han M, et al. Application progress of texture analyzer in the determination of tobacco leaf mechanical properties [J]. Journal of Zhengzhou University of Light Industry, 2021, 36(3): 63-69.

[15] 张玉海, 胡宗玉, 卢敏瑞, 等. 基于烟叶力学特性的打叶水分适宜性分析及应用[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(6): 164-167, 185.

Zhang Y H, Hu Z Y, Lu M R, et al. Analysis and application of water suitability for threshing based on mechanical properties of tobacco leaves [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2022, 50(6): 164-167, 185.

[16] 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 M Y, Song C J, Li D G, et al. Establishment and verification of method for measuring surface adhesive force of paper-making process reconstituted tobacco [J]. Tobacco Science & Technology, 2019, 52(2): 96-100.

[17] 李洪涛, 张玉海, 张小宏, 等. 造纸法再造烟叶动态摩擦系数测定方法[J]. 食品工业, 2019, 40(11): 206-210.

Li H T, Zhang Y H, Zhang X H, et al. The determination method of dynamic friction coefficient of paper-making process reconstituted tobacco [J]. The Food Industry, 2019, 40(11): 206-210.

[18] YC/T 152—2001 卷烟 烟丝填充值的测定[S].

YC/T 152—2001 Cigarette—Determination of filling power of cut tobacco [S].

[19] YC/T 178—2003 烟丝整丝率、碎丝率的测定方法[S].

YC/T 178—2003 Method for determination of whole cut rate and broken cut rate of tobacco shreds [S].

[20] YC/T 28.3—1996 卷烟物理性能的测定 第3部分: 圆周 光电法[S].

YC/T 28.3—1996 Determination of physical properties of cigarettes—Part 3: Circumference—Photoelectricity method [S].

[21] YC/T 28.4—1996 卷烟物理性能的测定 第4部分: 重量[S].

YC/T 28.4—1996 Determination of physical properties of cigarettes—Part 4: Weight [S].

[22] YC/T 28.5—1996 卷烟物理性能的测定 第5部分: 吸阻[S].

YC/T 28.5—1996 Determination of cigarettes physical properties of cigarettes—Part 5: Draw Resistance [S].

[23] YC/T 28.6—1996 卷烟物理性能的测定 第6部分: 硬度[S].

YC/T 28.6—1996 Determination of cigarettes physical properties of cigarettes—Part 6: Hardness [S].

[24] 朴永革, 张贾宝, 崔成哲, 等. 烟草非挥发性有机酸、pH测定及其相关性分析[J]. 食品与机械, 2022, 38(2): 32-39.

Piao Y G, Zhang J B, Cui C Z, et al. Determination and correlation analysis of tobacco non-volatile organic acids and pH [J]. Food and Machinery, 2022, 38(2): 32-39.

[25] 王宗英, 史建新, 王永红, 等. 切丝宽度对中支卷烟烟丝结构、烟支理化指标及感官质量的影响[J]. 烟草科技, 2020, 53(1): 81-88.

Wang Z Y, Shi J X, Wang Y H, et al. Influences of cut tobacco width on cut tobacco structure, physical and chemical indexes and sensory quality of cigarette with medium circumference [J]. Tobacco Science & Technology, 2020, 53(1): 81-88.

[26] 孙东亮, 李倩, 张金钢, 等. 卷烟气流特性通用数字化表征模型的建立及应用[J]. 中国烟草学报, 2025, 31(2): 19-29.

Sun D L, Li Q, Zhang J G, et al. Establishment and application of a generalized digital model for cigarette airflow characteristics [J]. Acta Tabacaria Sinica, 2025, 31(2): 19-29.

[27] 潘著, 崔晓梦, 叶蔚, 等. 烟丝结构对细支卷烟质量影响研究进展[J]. 农产品加工, 2021(18): 75-78.

Pan Z, Cui X M, Ye W, et al. Research process on the effects of cut tobacco structure on slim cigarette quality [J]. Farm Products Processing, 2021(18): 75-78.

[28] 李栋, 胡德武, 韩康, 等. 造纸法烟草薄片形态对烟丝理化特性的影响[J]. 中国造纸, 2024, 43(6): 80-86.

Li D, Hu D W, Han K, et al. Effect of the morphology of reconstituted tobacco for physical and chemical properties

of cut tobacco [J]. China Pulp & Paper, 2024, 43 (6): 80-86.

Effects of physical properties of reconstituted tobacco sheets on cut filler and cigarette characteristics for heated tobacco products

Yao Jianwu^{1,2,3}, Liu Zhichang^{1,2,3}, Liu Xiongbin^{1,2,3}, Hu Nianwu^{1,2,3}, Chen Yizhen^{1,2,3}, Huang Minhui⁴, Yang Nan⁴

1. China Tobacco Hubei Industrial Co., Ltd., Wuhan 430040, China;

2. Technical Center, Hubei Xinye Reconstituted Tobacco Development Co., Ltd., Wuhan 430056, China;

3. Applied Technology Research of Reconstituted Tobacco Hubei Province Key Laboratory, Wuhan 430056, China;

4. School of Life and Health Sciences, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China

Abstract:【Objective】To investigate the physical properties of reconstituted tobacco sheets produced by different processes and to examine their relationships with the cut filler characteristics and cigarette properties of heated tobacco products. 【Methods】Gas chromatography and scanning electron microscopy were used to characterize the chemical composition and microstructure of reconstituted tobacco sheets produced by three processes, namely the slurry, rolling, and dry method. A texture analyzer was employed to measure their physical properties, including elastic modulus, fracture strength, and surface adhesion. Grey relational analysis and multiple linear regression were then applied to evaluate the correlations and influence weights between these physical properties and cut filler characteristics (long strand proportion, broken strand proportion, filling value) as well as cigarette physical properties (weight, circumference, draw resistance, hardness). 【Results】Significant differences were observed in the chemical composition, microstructure, and physical properties among the reconstituted tobacco sheets produced by the three processes. The dry-method sheets exhibited a loose and porous structure, high fiber content, and the lowest amount of liquid components, resulting in a tough texture. The rolling-method sheets displayed a dense structure, the highest liquid content, high elongation at break, and strong resistance to fracture. The slurry-method sheets showed moderate composition and structure, with high strength but low elongation at break, making them prone to fracture. Correlation and regression analyses revealed that the long strand proportion was positively correlated with the longitudinal tensile fracture strength and transverse shear strength, with influence weights of approximately 13.228% and 11.338%, respectively. The filling value was positively correlated with the longitudinal elastic modulus and longitudinal elongation at break, with influence weights of about 21.624% and 12.231%. Cigarette properties were predominantly associated with the filling value and long strand proportion. 【Conclusion】Key physical properties of reconstituted tobacco sheets, such as longitudinal elastic modulus, longitudinal tensile strength at break, and elongation, influence the filling value and long strand proportion of the cut filler, which in turn affect cigarette physical properties including draw resistance, weight, and circumference. These findings provide a theoretical reference for the subsequent process optimization, texture control, and blending design of reconstituted tobacco sheets for heated tobacco products.

Key words: heated tobacco products; reconstituted tobacco sheets; textural property; cut filler characteristic; cigarette physical property; grey relational analysis

[责任编辑:刘丹丹 贾学伟]