



程传玲,杨淑萌,鲁平,等. 烟灰宏观黏度因子与卷烟包灰性能的关系研究[J]. 轻工学报,2025,40(5): 110-117.

CHENG C L, YANG S M, LU P, et al. The relationship between cigarette ash macroscopic viscosity factor and cigarette ash integrity[J]. Journal of Light Industry, 2025, 40(5): 110-117. DOI:10.12187/2025.05.013

烟灰宏观黏度因子与卷烟包灰性能的关系研究

程传玲¹, 杨淑萌¹, 鲁平², 楚文娟², 张小娜², 韩路², 崔春², 王豪礼³

1. 郑州轻工业大学 烟草科学与工程学院, 河南 郑州 450001;
2. 河南中烟工业有限责任公司 技术中心, 河南 郑州 450016;
3. 湖北中烟工业有限责任公司 三峡卷烟厂, 河南 宜昌 443100

摘要: 为了探究烟灰黏度与卷烟包灰性能之间的关系, 尝试以面粉为稳定剂制备烟灰/面粉混合试样, 以解决烟灰不溶于水, 无法形成稳定体系的问题, 在这些基础上建立了利用光学微流变仪测定烟灰宏观黏度因子 (*MVI*) 的方法, 对不同牌号卷烟烟灰 *MVI*、包灰值、灰度值和持灰能力进行了测定, 并通过相关性分析研究烟灰 *MVI* 与卷烟包灰性能之间的关系。结果表明: 以面粉为稳定剂制备烟灰/面粉混合试样, 可以大幅提升 *MVI* 曲线的稳定性, 满足区分不同牌号卷烟烟灰黏度差异性的要求; Logistic 函数能够较好地拟合 *MVI* 曲线, 其 R^2 达到 0.99 以上; 烟灰 *MVI* 与卷烟包灰值、灰度值之间呈显著正相关关系, 即随着 *MVI* 的增大, 灰柱的视觉效果变差。因此, 适当降低烟灰 *MVI*, 有利于改善卷烟的包灰性能。

关键词: 卷烟; 烟灰; 宏观黏度因子; 包灰性能

中图分类号: TS452 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-1553(2025)05-0110-08

0 引言

包灰性能的优劣主要影响卷烟燃烧后形成灰柱的视觉效果, 这与消费者的消费体验有关, 日益受到关注^[1-2]。目前, 相关研究主要聚焦于影响包灰性能的因素, 一方面, 从烟丝、卷烟纸等原料的性质入手, 通过优化原材料来改善包灰性能。研究^[3-4]发现, 烟丝中的金属元素对卷烟包灰性能有显著影响, 如烟丝中的钾元素和锰元素与包灰性能呈正相关, 而硫元素和氯元素与包灰性能呈负相关。卷烟纸参数也会影响卷烟的包灰性能^[5-10], 杨

露等^[11]采用均匀设计的方法进行研究发现, 卷烟纸灰分含量的增加会使卷烟包灰白度变白, 持灰能力增加, 但如果卷烟纸灰分含量过大, 则会导致卷烟在制作过程中出现断裂和掉粉的问题; 权发香等^[12]研究了卷烟纸的持灰性能及其影响因素, 发现随着卷烟纸透气度、碳酸镁添加量和钠钾比的增加, 卷烟持灰能力呈现不同的变化趋势。另一方面, 从烟灰自身性质出发, 探究包灰性能优劣的成因或机理。烟灰是卷烟燃烧的残留物质, 其理化性质不仅与卷烟叶组配方、添加剂、卷烟纸等原材料的性质有关, 还会受到卷烟燃烧状况的影响^[13]。其中, 烟

收稿日期: 2024-04-19; 修回日期: 2025-06-15; 出版日期: 2025-10-15

基金项目: 中国烟草总公司重大科技项目 (110202101079(SJ-03)); 河南中烟工业有限责任公司重点科技项目 (A202013)

作者简介: 程传玲 (1977—), 女, 河南省唐河县人, 郑州轻工业大学教授, 博士, 主要研究方向为烟草烟气化学及烟草工艺。

E-mail: chuanlingcheng@163.com

通信作者: 鲁平 (1971—), 女, 河南省新野县人, 河南中烟工业有限责任公司高级工程师, 主要研究方向为烟草加工工艺。

E-mail: xyluping@126.com

灰燃烧完全性是影响其颜色的关键因素,卷烟烟灰燃烧越完全,烟灰颜色越白,反之,烟灰颜色越黑^[14]。王孝峰等^[15]从烟丝和卷烟纸残留物的外观、微观形貌、元素分布及化学组成等方面探究了烟灰形成的机制,这有助于定性分析卷烟包灰性能优劣的成因。卷烟灰柱由烟丝灰分凝聚体及附着于其表面的卷烟纸灰分凝聚层组成,从理论上讲,烟灰黏度会影响其凝聚性,进而影响卷烟包灰性能。然而,目前有关烟灰黏度对卷烟包灰性能影响的研究鲜见报道。

烟灰的主要成分是无机物^[16],属于弱黏性固态物质,这为其黏度测定带来了较大困难。有研究^[17-19]表明,固态淀粉在制备成凝胶态淀粉后,可以借助光学微流变仪测量其宏观黏度因子(*MVI*),这为测定烟灰 *MVI* 提供了借鉴,但烟灰在纯水中无法形成稳定的体系,致使得到的 *MVI* 曲线不稳定且重复性差。鉴于此,本文拟建立一种以面粉为稳定剂制备烟灰/面粉混合试样,间接测量烟灰 *MVI* 的方法,并研究烟灰 *MVI* 对卷烟包灰性能的影响,以期为深入探究卷烟包灰性能优劣及持续改进卷烟包灰性能提供参考。

1 材料与方法

1.1 主要材料、试剂和仪器

主要材料:包灰性能差异较大的常规卷烟样品 14 种,编号 1[#]—14[#],河南、云南、贵州、江苏中烟工业有限责任公司提供;市售小麦粉,中粮郑州粮油工业有限公司。

主要仪器:RHEOLASER MASTERTM 型光学微流变仪,法国 FORMULACTION 有限公司;SQP 型电子天平,赛多利斯科学仪器北京有限公司;KBF240 型恒温恒湿箱,德国 BINDER 公司;Kerrie 型通风橱,广东科艺普实验室设备研制有限公司;卷烟包灰性能测试箱,郑州轻工业大学实验室自主设计并搭建;EOS70D 型数码相机,佳能(中国)有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 烟灰 *MVI* 测定方法 由于烟灰不溶于水,不能形成稳定的体系,而充分糊化并冷却后的凝胶

状小麦面粉性质稳定^[20],因此,可以利用凝胶面粉体系作为测定烟灰 *MVI* 的稳定剂。

1)面粉前处理。选用执行国家标准^[21]的高筋小麦面粉,使用孔径 0.15 mm、网目 100 的筛网进行筛分,保证面粉颗粒均匀。

2)烟灰样品制备。选取某常规卷烟 80 支,置于温度 (22±1)℃、相对湿度 (60±2)% 的恒温恒湿箱中平衡 48 h。将平衡后的卷烟样品在通风橱中以阴燃方式燃烧成烟灰,收集烟灰并研磨 3~5 min,将片状烟灰研磨成细小的颗粒后放入密封袋中密封保存。

3)烟灰/面粉混合样品制备。称取 1 g 烟灰、12 g 面粉置于 250 mL 烧杯中,加入 120 mL 蒸馏水,搅拌均匀;将烧杯放入 95℃ 的水浴锅中,使用电动搅拌器(转速为 1200 转)不断搅拌加热 30 min,使面粉和烟灰受热均匀,充分糊化;将烧杯置于常温环境下,使用电动搅拌器搅拌 5 min,使烟灰与面粉混合均匀。

4)烟灰 *MVI* 测定。取 20 mL 烟灰/面粉混合样品迅速灌入测试玻璃瓶(高 140 mm,直径 16 mm)中,使用光学微流变仪测定 *MVI*,绘制 *MVI* 随时间变化的曲线,测量温度设置为 60℃,测定时长为 2.5 h。利用 Logistic 函数(见式①)对数据进行拟合,根据拟合后的方程计算 2.5 h 时的 *MVI*。每个样品重复测定 3 次,结果取平均值。

$$y = A_2 + (A_1 - A_2)/(1 + (x/x_0)^p) \tag{①}$$

式中, A_1 、 A_2 表示拟合模型的调整参数, x_0 、 p 表示测量时间对 *MVI* 的影响参数, y 表示 $MVI/(nm^{-2} \cdot s)$, x 表示测量时间/min。

1.2.2 烟灰 *MVI* 测定条件优化 首先,以 3[#]卷烟烟灰为对象,通过实验确定面粉作为测定烟灰 *MVI* 稳定剂的可行性,再通过正交试验对烟灰与面粉混合比例、加水量,以及加热过程中搅拌时间进行优化,根据 *MVI* 值是否在适宜范围、*MVI* 拟合效果及测定结果的稳定性确定最优测定条件,并选择 1[#]—6[#] 卷烟烟灰为对象进行重复性验证。

1)面粉作为稳定剂的可行性评价实验。为了便于对比,将纯烟灰制备的测试样称为纯烟灰试样,将烟灰/面粉混合制备的测试样称为混合试样。

试样的制备:在不同量的粉末中加入蒸馏水,搅拌均匀后置于水浴锅中加热,加热过程中使用玻璃棒不断搅拌,之后取 20 mL 试样迅速转移到测量瓶中测定纯面粉凝胶的 *MVI*,具体制备条件如表 1 所示。

2) 测定条件的优化实验。在参阅相关文献^[22-23]的基础上,对烟灰与面粉混合比例、加水量和加热过程中搅拌时间进行优化,设计 $L_9(3^4)$ 正交试验方案。

3) 重复性验证实验。以 1[#]—6[#] 卷烟烟灰为对象,按照所确定的最优方法测量 *MVI*,每种样品重复测量 3 次。

1.2.3 烟灰 *MVI* 与卷烟包灰性能关系研究 选取 8 种灰柱视觉效果不同的卷烟(7[#]—14[#]),按照文献[7,24-25]中的方法测量卷烟包灰值、灰度值、持灰能力,同时采集灰柱图片、收集烟灰,利用 1.2.1 方法测量其 *MVI*。

1.3 数据处理

处理数据采用图示法、方差分析、多重比较、非线性曲线拟合等方法;利用 SPSS 22.0、Origin 2021 和 RheoSoft Master1.4.0.1 软件进行绘图及数据分析。

2 结果与分析

2.1 烟灰 *MVI* 测定方法的验证结果及分析

2.1.1 面粉作为稳定剂的可行性分析 按 1.2.2 方法分别测定纯烟灰试样、纯面粉和烟灰/面粉混合试样的 *MVI*,结果见图 1 和图 2。由图 1 可知,纯烟灰试样的 *MVI* 曲线极不稳定且重复性差。这是因为光学微流变仪主要用于分析软物质(聚合物^[26]、乳液^[27]、凝胶^[28]等)在微米尺度上的流变特性。该仪器通过测量试样中颗粒因热能(布朗运动)产生的均方根位移,可以得到反映试样黏弹性能的指标。然而,烟灰溶液中含有大量不溶物,无

法形成均匀、稳定的凝胶体系,因此不适合直接进行测量。为此,笔者进一步以面粉作为稳定剂制备烟灰/面粉混合试样,以改善体系的稳定性,使其适用于光学微流变仪的测量。

由图 2 可知,纯面粉性质稳定,其 *MVI* 基本不存在差异,因此采用面粉作为测定烟灰 *MVI* 的稳定剂是可行的。结合图 1 可知,烟灰面粉混合试样 *MVI* 曲线的稳定性较纯烟灰试样大幅提高,接近纯面粉的 *MVI* 曲线,说明面粉的稳定效果十分明显。此外,烟灰/面粉混合试样 *MVI* 曲线的变化趋势与纯面粉相似,但 *MVI* 明显低于纯面粉,说明烟灰与面粉的 *MVI* 之间存在着较大差异,面粉不仅起到了稳定剂的作用,且对烟灰的 *MVI* 未产生明显影响,这为排除稳定剂的干扰、比较不同卷烟烟灰的 *MVI* 奠定了良好的基础。

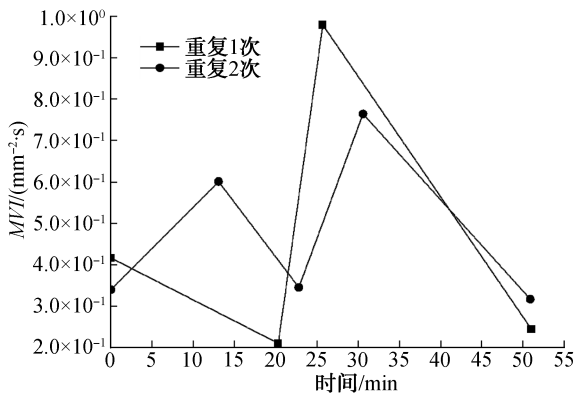


图 1 纯烟灰试样的 *MVI* 图
Fig. 1 The *MVI* plot of pure cigarette ash sample

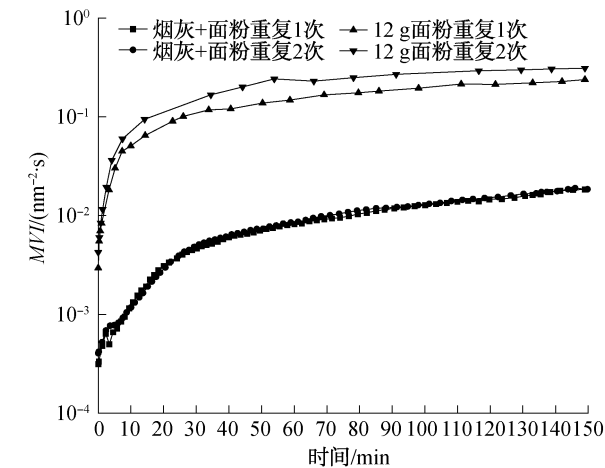


图 2 纯面粉及烟灰/面粉混合试样的 *MVI* 图
Fig. 2 The *MVI* plot of pure flour and the mixed ash/flour sample

表 1 不同试样制备条件

试样	蒸馏水/mL	温度/℃	加热时间/min	测量 <i>MVI</i> 时间/h	实验次数
2 g 烟灰	20	—	—	1.0	2
12 g 面粉	90	95	30	2.5	2
2 g 烟灰+10 g 面粉	90	95	30	2.5	2

注:—表示未进行处理。

烟灰/面粉混合试样的 MVI 是烟灰和面粉凝胶黏性的综合表征,也可视为烟灰对面粉凝胶特性的影响。纯面粉之间的 MVI 不存在差异,但如果添加不同烟灰后,面粉凝胶特性变异的程度足够大,则可说明不同烟灰的黏度差异明显,因此,烟灰/面粉混合试样的 MVI 可以间接表征烟灰的黏度,简称为烟灰 MVI 。

2.1.2 测定条件优化及分析 1) 正交试验结果分析。由图 2 可知,虽然烟灰/面粉混合试样 MVI 曲线的稳定性得到了明显提升,但重复性较纯面粉尚有较大差距,且 MVI 的拟合效果也不够理想。为此,对烟灰与面粉质量比、加水量和加热过程中搅拌时间进行优化,根据测定的烟灰 MVI 结果对上述因素进行极差分析,结果见表 2。

由表 2 可知,除试验 4、5 和 7 条件下方程拟合的 R^2 相对较高外,其他均相对较低,还可以看出除试验 4 和 5 外,其余试验条件下的 RSD 都比较大,测量结果不稳定,并且 MVI 过大或过小,都不利于后期的比较。对于试验 4 和 5 来说,其 RSD 均小于 10%,其中试验 5 条件下的测量结果更加稳定,由极差分析可知,不同条件的影响顺序为加水量>搅拌时间>烟灰与面粉质量比。因此,可以选择试验 5 的加水量,在试验 5 条件的基础上,分析不同搅拌时间下 MVI 的测定结果,以便确定最佳测定条件。

表 2 正交试验极差分析结果

Table 2 Results of range analysis for orthogonal experiment

试验号	烟灰与面粉质量比	加水量/mL	搅拌时间/min	R^2	$MVI/(\text{nm}^{-2} \cdot \text{s})$	$RSD/\%$
1	1 : 11	100	20	0.603	0.007	11.40
2	1 : 11	120	30	0.539	0.006	13.35
3	1 : 11	140	40	0.444	0.005	12.98
4	1 : 12	100	30	0.996	0.327	9.50
5	1 : 12	120	40	0.993	0.236	5.23
6	1 : 12	140	20	0.661	0.002	24.90
7	1 : 13	100	40	0.976	0.660	34.06
8	1 : 13	120	20	0.693	0.024	34.19
9	1 : 13	140	30	0.783	0.015	27.77
K_1	0.006 3	0.331 2	0.011 1	—	—	—
K_2	0.188 3	0.088 7	0.116 1	—	—	—
K_3	0.232 7	0.007 4	0.300 2	—	—	—
R_j	0.226 4	0.323 8	0.289 2	—	—	—
主次顺序				加水量>搅拌时间>烟灰面粉比		

2) 搅拌时间的确定。在 20~40 min 内考查搅拌时间对 MVI 测定结果的影响见图 3。由图 3 可知, MVI 在一定范围内随搅拌时间的增大而增大,当搅拌时间升到 30 min 后,烟灰 MVI 基本保持不变。因此,将烟灰面粉的搅拌时间设定为 30 min。

所得烟灰/面粉混合试样为灰白色不透明状凝胶,经 95 ℃ 高温处理后已经充分糊化,冷却至室温以后,该体系黏度不再随环境发生变化。

2.1.3 测量方法的重复性分析 利用 6 种卷烟烟灰对测量方法进行验证实验,结果见图 4 和表 3。由图 4 可知,不同卷烟烟灰的 MVI 曲线变化趋势相似,随测量时间的延长均呈先快速升高后逐渐趋于稳定的趋势,符合公式①所示 Logistic 函数描述的变化规律。对 6 种卷烟烟灰各 3 次重复测量的 MVI 曲线进行拟合(见表 3)可知, R^2 为 0.990~0.997,表明 Logistic 函数能够较好地拟合 MVI 曲线。

利用 Logistic 函数计算不同卷烟烟灰的 MVI ,结果见表 3。由表 3 可知,卷烟重复测量结果的 RSD 为 2.383%~7.705%,方差齐性检验结果为差异不显著(Levene 统计量为 2.180、 $P=0.125$),说明利用该方法测定不同卷烟烟灰 MVI 的重复性均较好。单因素方差分析结果表明样品间 MVI 的总体差异极显著($P=0.000$),LSD 多重比较结果则在 $P=0.01$ 水平上将 6 个样品分成了 4 个等级(A~D),在 $P=0.05$ 水平上存在差异的 4[#]、5[#]样品的平均 MVI 相差 0.024 $\text{nm}^{-2} \cdot \text{s}$,进一步说明该方法具有较好的重复性,能够满足区分不同卷烟烟灰 MVI 的要求。

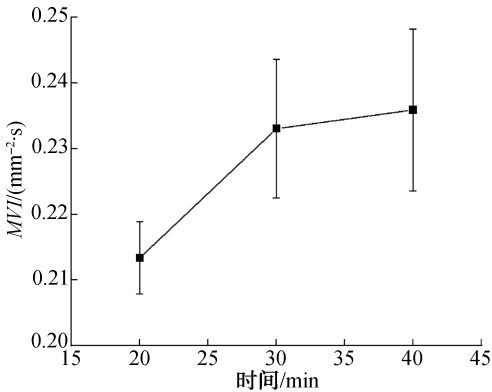


图 3 不同搅拌时间对 MVI 测定结果的影响
Fig. 3 Changes in MVI measurement results under different mixing times

2.2 卷烟烟灰 MVI 与包灰性能之间的关系分析

为确保结果的客观性,另选取 8 种包灰视觉效果不同的卷烟,采集其静燃后的灰柱图片,测量卷烟包灰值、灰度值、持灰能力及烟灰 MVI,并分析各指标之间的关系,结果见表 4 和表 5。由表 4 可知,不同卷烟烟灰的 MVI 为 0.149~0.279 nm⁻²·s,除 8[#] 卷烟外,其余卷烟的变异系数均小于 10%;包灰值为 1.807~4.740,变异系数均较大;灰度值为 0.310~0.374,持灰能力为 40.830~46.286 mm,变异系数均小于 10%。由表 5 可知,烟灰 MVI 与包灰值、灰度值呈显著正相关关系,即卷烟烟灰 MVI 越大,结合视觉效果,灰柱表面裂纹越明显、灰色越黑,整体视觉效果越差。

利用 S-N-K 法对 8 种卷烟的烟灰 MVI 进行多重比较,结果见表 6。由表 6 可知,8 种卷烟在 P=0.05 水平上被分成了 4 组,按 MVI 由小到大排序为

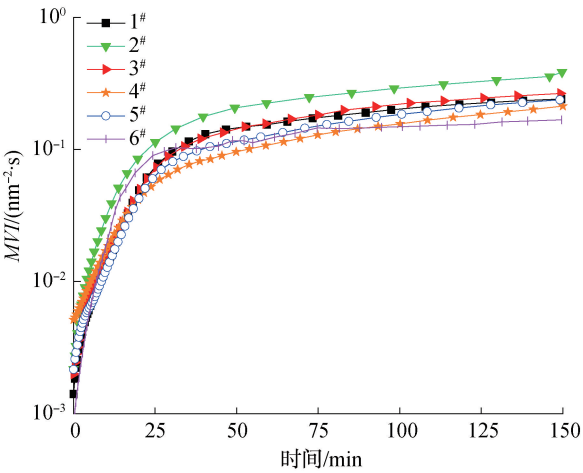


图 4 不同卷烟烟灰的 MVI 曲线

Fig. 4 The MVI plot of different cigarette ashes

12[#]<10[#]<(11[#]<9[#]<14[#]<13[#])<(7[#]<8[#])。将 8 种卷烟的灰柱图片按照 MVI 的排序结果进行排列(见图 5)可以看出,卷烟灰柱的视觉效果与其烟灰的 MVI 之间存在很强的相关性,12[#] 卷烟的烟灰 MVI 最小,其灰柱的视觉效果最好,表现为灰柱表面烟灰包裹紧致、无明显裂纹,10[#] 卷烟的烟灰 MVI 较小,其灰柱的视觉效果也较好,表现为灰柱表面烟灰包裹紧致、局部裂纹较明显,11[#]、9[#]、14[#]、13[#] 的烟灰 MVI 较大,其灰柱的视觉效果较差,表现为灰柱表面烟灰包裹较松散、裂纹明显且有较明显的翻片,7[#]、8[#] 卷

表 3 Logistic 函数参数估计值及 MVI 值
Table 3 Estimated values of logistic function parameters and MVI values

样品	参数				R ²	MVI		
	A ₁	A ₂	X ₀	P		测定值/ (nm ⁻² ·s)	均值/ (nm ⁻² ·s)	RSD/ %
1 [#] -1	-0.003	1.154	632.885	0.968	0.996	0.259	0.254 ^{Bb}	3.393
1 [#] -2	-0.001	0.276	49.408	1.634	0.995	0.258		
1 [#] -3	-0.002	0.310	73.603	1.317	0.996	0.244		
2 [#] -1	-0.001	0.459	82.325	1.314	0.997	0.315	0.335 ^{Aa}	6.216
2 [#] -2	-0.002	0.485	66.540	1.268	0.996	0.357		
2 [#] -3	-0.002	0.483	83.913	1.361	0.997	0.332		
3 [#] -1	0.004	0.254	31.176	2.999	0.994	0.251	0.256 ^{Bb}	2.706
3 [#] -2	0.000	0.430	113.969	1.297	0.995	0.252		
3 [#] -3	0.000	0.333	62.113	1.525	0.996	0.264		
4 [#] -1	-0.005	0.243	37.771	1.524	0.990	0.216	0.215 ^{Cc}	2.383
4 [#] -2	0.000	0.549	242.424	1.002	0.997	0.210		
4 [#] -3	-0.001	0.231	32.235	1.999	0.990	0.220		
5 [#] -1	-0.008	0.299	39.535	1.326	0.990	0.254	0.239 ^{BCb}	7.705
5 [#] -2	-0.005	0.552	182.578	1.056	0.996	0.245		
5 [#] -3	-0.006	0.448	153.605	0.962	0.997	0.219		
6 [#] -1	-0.002	0.171	21.683	1.838	0.991	0.166	0.167 ^{Dd}	3.552
6 [#] -2	-0.003	0.176	29.494	1.371	0.993	0.162		
6 [#] -3	0.002	0.175	25.345	3.001	0.990	0.174		

注:同列不同大写字母表示处理间差异显著(P<0.05),同列不同小写字母表示处理间差异极显著(P<0.01)。

表 4 不同卷烟烟灰 MVI 及包灰性能测试结果

Table 4 Test results of MVI and ash integrity of different cigarettes

牌号	MVI		包灰值		灰度值		持灰能力	
	均值/(nm ⁻² ·s)	RSD/%	均值	RSD/%	均值	RSD/%	均值/mm	RSD/%
7 [#]	0.265	7.229	3.407	24.700	0.374	5.300	40.830	7.053
8 [#]	0.279	11.631	4.728	20.097	0.358	5.500	43.755	4.934
9 [#]	0.223	4.940	3.823	16.800	0.360	4.400	45.050	4.300
10 [#]	0.182	9.627	1.838	19.217	0.332	4.100	46.286	6.757
11 [#]	0.222	2.481	2.558	14.100	0.328	4.200	42.260	4.100
12 [#]	0.149	2.712	1.807	27.500	0.310	3.500	45.750	4.000
13 [#]	0.227	5.010	4.740	19.100	0.327	3.700	44.790	5.000
14 [#]	0.224	8.195	4.354	29.100	0.359	7.600	41.260	4.100

烟的烟灰 *MVI* 最大,其灰柱的视觉效果也较差,表现为灰柱表面烟灰包裹松散、裂纹、翻片现象明显。综上可知,卷烟灰柱的视觉效果随烟灰 *MVI* 增大总体呈变差趋势,主要表现为烟灰包裹的紧致程度逐渐降低,裂纹和翻片现象逐渐明显。

表 5 烟灰 *MVI* 与包灰性能各指标的关系分析表
Table 5 Analysis of the relationship between *MVI* of cigarette ash and various indicators of ash integrity

指标	<i>MVI</i>	包灰值	灰度值	持灰能力
<i>MVI</i>	1	0.748 *	0.815 *	-0.536
包灰	0.748 *	1	0.620	-0.184
灰度	0.815 *	0.620	1	-0.594
持灰能力	-0.536	-0.184	-0.594	1

注: * 表示在 $P=0.05$ 水平上显著, ** 表示在 $P=0.01$ 水平上显著。

表 6 不同卷烟烟灰 *MVI* 的 S-N-K 多重比较结果
Table 6 S-N-K multiple comparison results of *MVI* of different cigarette ashes

牌号	自由度	$P = 0.05$ 水平上的子集			
		1	2	3	4
12 [#]	3	0.149			
10 [#]	3		0.182		
11 [#]	3			0.222	
9 [#]	3			0.223	
14 [#]	3			0.224	
13 [#]	3			0.227	
7 [#]	3				0.265
8 [#]	3				0.279
<i>P</i> 值		1.000	1.000	0.977	0.333

卷烟灰柱由烟丝灰分凝聚体及包裹在其表面的卷烟纸灰分组成,卷烟纸灰分犹如烟丝灰分凝聚体表面的涂层,涂敷效果直接决定灰柱视觉效果的优劣,而涂敷效果则与烟丝和卷烟纸灰分的性质有关。文献[15]研究结果表明,在卷烟纸及烟丝灰分的形成过程中,纤维素逐渐消失,而 CaCO_3 颗粒发生团聚并相互粘连,几乎融合成一个整体。这种颗粒粘连的现象与 K^+ 、 Na^+ 与 CaCO_3 、 CaO 形成的固溶体有关,使其具有一定的黏性,从而导致灰柱呈现不同的视觉效果。对于烟丝灰分而言,黏度会影响灰分凝聚体的强度和形貌,进而影响卷烟纸灰分在其表面的附着效果。如果黏度过低,凝聚体的强度会降低,无法为纸灰附着提供牢固的载体,从而易出现落灰现象;黏度过高,则易导致凝聚体严重收缩和变形,影响纸灰附着的匀贴度,易产生裂纹。对于卷烟纸灰分而言,黏度会影响 CaCO_3 和 CaO 颗粒之间黏连的紧密程度,从而影响其在烟丝灰分凝聚体表面的附着效果。当黏度过低时,无法形成连续、致密的纸灰,易出现落灰和裂纹现象;当黏度过高时,形成的灰片过大,则会因张力不均等原因导致纸灰断裂,甚至出现翻片现象。

综上所述,在卷烟燃吸过程中,烟丝和卷烟纸灰分均出现了凝聚现象,且凝聚程度与各自的 *MVI* 有关。卷烟灰柱的视觉效果随烟灰 *MVI* 的变化而变化,这是两种凝聚现象共同作用的结果。

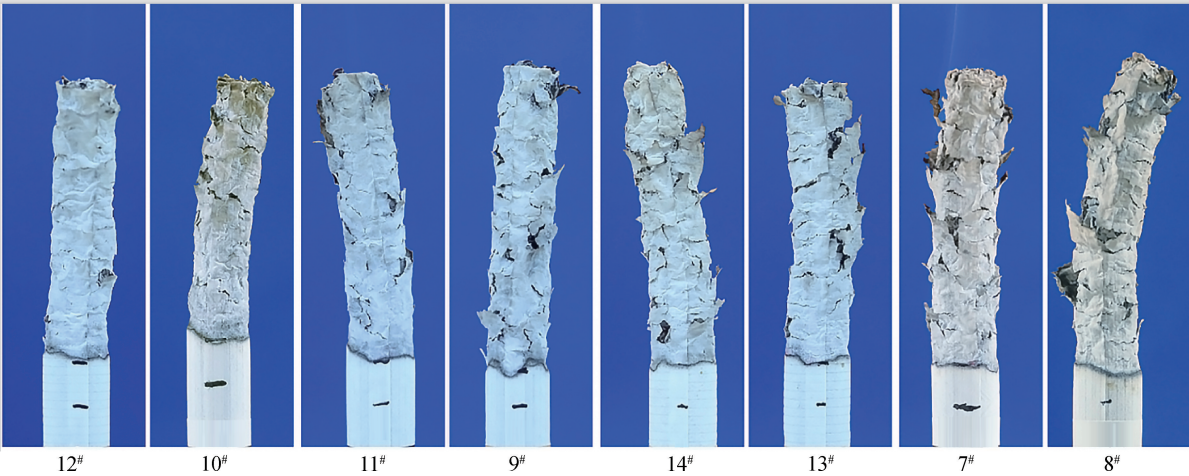


图 5 不同卷烟的灰柱图片
Fig. 5 Gray column images of different cigarettes

3 结论

本研究以面粉为稳定剂制备了烟灰/面粉混合试样,较好地解决了纯烟灰溶液稳定性差的问题,建立了一种基于光学微流变仪测定烟灰 *MVI* 的方法,并利用该方法研究了烟灰 *MVI* 与卷烟包灰性能之间的关系,得出以下结论:以面粉为稳定剂制备的烟灰/面粉混合试样,显著提高了烟灰 *MVI* 曲线的稳定性,能够有效区分不同牌号卷烟烟灰的黏度差异。本文建立的检测方法具有较好的重复性,能够满足实际应用的需求。Logistic 函数能够较好地拟合烟灰/面粉混合试样的 *MVI* 曲线, R^2 达到 0.99 以上,适用于描述烟灰 *MVI* 随时间变化的规律。不同牌号卷烟的烟灰 *MVI* 之前存在显著差异,且烟灰 *MVI* 与卷烟的包灰值、灰度值呈显著正相关。随着烟灰 *MVI* 的增大,灰柱的视觉效果变差,表现为灰柱表面裂纹增多、颜色变深。因此,适当降低烟灰 *MVI* 有助于改善卷烟的包灰性能,通过进一步研究其调控方法有望为优化卷烟燃烧品质提供关键支撑。

参考文献:

- [1] 楚文娟,郭丽霞,程东旭,等. 基于 K-means 聚类及模糊判别的卷烟包灰性能综合评价方法[J]. 轻工学报, 2024,39(6):93-100.
- [2] 鲁平,楚文娟,崔春,等. 烟丝填充状态对卷烟卷制品质及包灰性能的影响[J]. 轻工学报,2023,38(5):68-73,82.
- [3] 王孝峰,郭东锋,张晓宇,等. 卷烟燃烧包灰与烟丝化学成分的关系[J]. 烟草科技,2022,55(2):45-51.
- [4] 余鑫. 烟丝/卷烟纸参数对卷烟综合燃烧特性的影响研究[D]. 郑州:郑州轻工业大学,2024.
- [5] 楚文娟,崔建华,王建民,等. 基于卷烟纸参数的卷烟静态包灰综合评价方法[J]. 烟草科技,2021,54(11):69-76.
- [6] 熊丽红,赵亚博,张国强,等. 卷烟纸物理指标对灰分指标的影响[J]. 科技创新与应用,2024,14(25):93-96,100.
- [7] 李欢,王建民,王豪礼,等. 卷烟纸参数对卷烟持灰能力的影响[J]. 食品与机械,2021,37(6):207-212.
- [8] 田雨,夏莺莺,柴张祺,等. 优化卷烟纸降低中支卷烟燃烧锥落头倾向研究[J]. 中国造纸,2023,42(6):82-87.
- [9] 倪和朋,马立,李洪涛,等. 烟丝及卷烟纸组合对包灰性能匹配性的影响[J]. 中国烟草学报,2025,31(1):

48-56.

- [10] 唐小雪,潘连华,黄宇亮,等. 卷烟纸参数对中支卷烟常规烟气成分释放量及其符合度的影响[J]. 轻工学报,2023,38(2):102-109.
- [11] 杨露,缪祥凯,谢勇,等. 卷烟纸相关参数对卷烟包灰性能和主流烟气的影响分析[J]. 造纸装备及材料, 2023,52(4):9-11.
- [12] 权发香,杨露,张琪卿,等. 卷烟纸持灰性能及其影响因素分析[J]. 造纸装备及材料,2023,52(3):7-9.
- [13] 王建民,王豪礼,鲁平,等. 卷烟烟灰 pH 值与燃烧及包灰性能间的关系[J]. 云南化工,2023,50(6):24-29.
- [14] 马胜楠,冯亚婕,赵怡凡,等. 卷烟烟灰燃烧完全性与白度的关系[J]. 云南化工,2019,46(1):15-18.
- [15] 王孝峰,张劲,郑丰,等. 卷烟燃烧灰分形成机制研究[J]. 中国烟草学报,2022,28(2):14-26.
- [16] 黄洪渊,戴宇,孙炜蒙,等. 能谱分析卷烟灰炆化学成分[J]. 大众科技,2018,20(5):34-36.
- [17] 田缘,李双红,周韵,等. 淀粉糊老化行为的粒子示踪微流变表征方法初探[J]. 食品与发酵工业,2019,45(17):79-84.
- [18] 王春晓. 无机盐离子对玉米淀粉糊化过程的影响[D]. 杭州:浙江工商大学,2020.
- [19] 汪薇. 马铃薯淀粉/玉米淀粉共混体系理化性质、互作机理研究及其应用[D]. 武汉:华中农业大学,2017.
- [20] 李淑月. 不同种类淀粉共混糊化与凝胶特性研究[D]. 郑州:河南工业大学,2024.
- [21] 国家标准化管理委员会. 高筋小麦粉:GB/T 8607—1988[S]. 北京:中国标准出版社,1988.
- [22] 郭佳欣,张慧君,刘鑫宇,等. 玉米淀粉和马铃薯淀粉糊化后的流变性及热力学性质比较[J]. 中国果菜, 2022,42(3):1-5,39.
- [23] 王宏伟,肖乃勇,马颖. 超声处理时间对小麦淀粉聚集态结构及理化性能的影响[J]. 轻工学报,2019,34(5):10-19.
- [24] 冯亚婕,王建民,梁淼,等. 基于 ImageJ 的卷烟包灰值定量测定方法优化[J]. 食品与机械,2018,34(3):216-219.
- [25] 穆林,惠建权,冯亚婕,等. 卷烟烟灰灰度值测定方法的建立及应用[J]. 烟草科技,2018,51(7):67-72.
- [26] 李跃,邱藤,郭隆海,等. 用光学微流变研究硅烷偶联剂改性乳胶的流变性及稳定性[J]. 涂料工业,2021, 51(2):35-41.
- [27] 朱巧莎,侯占群,段盛林,等. 慢消化椰油乳液系列体系的构建及其微流变特性和体外消化特性对比[J]. 食品工业科技,2020,41(18):24-32.
- [28] 刘文景,范苏娜,张慧慧,等. 膀胱脱细胞基质预凝胶水溶液的微流变特性研究[J]. 合成技术及应用, 2019,34(1):11-15.

The relationship between cigarette ash macroscopic viscosity factor and cigarette ash integrity

CHENG Chuanling¹, YANG Shumeng¹, LU Ping², CHU Wenjuan², ZHANG Xiaona²,
HAN Lu², CUI Chun², WANG Haoli³

- 1. College of Tobacco Science and Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China
- 2. Technology Center, China Tobacco Henan Industrial Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China
- 3. Three Gorges Cigarette Factory, China Tobacco Hubei Industry Co., Ltd., Yichang 443100, China

Abstract: In order to investigate the relationship between the viscosity of cigarette ash and cigarette ash integrity, a method was established. First, flour was used as a stabilizer to prepare cigarette ash/flour mixed samples to solve the problem that cigarette ash is insoluble in water and cannot form a stable system. Then, the macroscopic viscosity factor (*MVI*) of cigarette ash was determined using an optical microrheometer. The *MVI*, ash value, gray value, and ash-holding capacity of cigarette ash from different brands of cigarettes were determined, and the correlation between the cigarette ash *MVI* and cigarette ash integrity was analyzed. The results showed that the stability of the *MVI* curve could be greatly improved by using flour as a stabilizer to prepare cigarette ash/flour mixed samples, which met the requirement for distinguishing the viscosity differences of cigarette ash from different brands. The Logistic function could fit the *MVI* curve well, and the R^2 value of the Logistic function was above 0.99. There was a significant positive correlation between the *MVI* of cigarette ash and the ash value and gray value of cigarette ash. As the *MVI* increased, the visual effect of the ash column deteriorated. Therefore, appropriately reducing the *MVI* of cigarette ash helps improve the cigarette ash integrity.

Key words: cigarette; cigarette ash; macroscopic viscosity factor; ash integrity

[责任编辑:王晓波 贾学伟]