



吴若昕,王钰,王嘉梁,等.加工参数对卷烟抽吸流畅性的影响研究[J].轻工学报,2026,41(4):84-93.
WU R X, WANG Y, WANG J L, et al. Effects of processing parameters on cigarette smoking smoothness[J].
Journal of Light Industry, 2026, 41(4): 84-93.
DOI: 10.12187/2026.04.008

加工参数对卷烟抽吸流畅性的影响研究

吴若昕¹, 王钰², 王嘉梁¹, 刘超¹, 张春涛¹, 王嘉乐¹, 郭紫莹², 李晓²

1. 上海烟草集团有限责任公司 天津卷烟厂, 天津 300163;
2. 郑州轻工业大学 烟草科学与工程学院, 河南 郑州 450001

摘要:【目的】研究不同加工参数(切丝宽度、叶丝干燥(HDT)参数(蒸汽温度与流量)、劈刀规格(弧长、槽深)下,卷烟孔隙率和动态吸阻对抽吸流畅性的影响。【方法】采用微焦点X射线CT扫描孔隙率并改进孔隙率表征方法,通过卷烟间动态吸阻标准差与分布一致性系数表征轴向动态吸阻稳定性及分布一致性,利用CRITIC与层次分析组合赋权法建立卷烟抽吸流畅性评价方法。【结果】1)CT扫描时对卷烟纸因素的考量,使卷烟孔隙率表征方法更为精确。2)随切丝宽度增加,卷烟孔隙率先增大后减小(1.00 mm时孔隙率最大)、分布均匀性逐渐降低,轴向动态吸阻稳定性与分布一致性均下降;随HDT蒸汽温度升高、蒸汽流量降低,卷烟孔隙率增大、分布均匀性降低,轴向动态吸阻稳定性下降、分布一致性升高;随劈刀弧长增加与槽深减小,卷烟孔隙率及其分布均匀性均减小,轴向动态吸阻稳定性上升、分布一致性先降低后升高,其中弧长18 mm、槽深2.5 mm时一致性最好。3)卷烟抽吸流畅性随切丝宽度的增加显著变差,随HDT蒸汽温度升高、蒸汽流量降低显著改善,劈刀规格的改变对其无显著影响。4)不同的加工参数下卷烟孔隙率分布均匀性与动态吸阻均极显著影响卷烟抽吸流畅性。【结论】在本文设置参数范围内,提高HDT蒸汽温度、降低蒸汽流量可改善卷烟抽吸流畅性,而增加切丝宽度会对卷烟抽吸流畅性产生不利影响。

关键词: 卷烟;加工参数;孔隙率;动态吸阻;抽吸流畅性

中图分类号: TS452 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-1553(2026)04-0084-10

0 引言

卷烟品质不仅关系消费者的感官体验与满意度,更直接影响品牌的市场竞争力。卷烟抽吸感受是卷烟品质的直观体现,而抽吸流畅性衍生于卷烟“三感”^[1],是消费者逐口抽吸得到的轻松、舒适与满足体验的综合感受,能反映消费者在抽吸过程中

对于逐口得到的烟气感受差异对卷烟整体抽吸感受影响的关注。孔隙率^[2-3]与动态吸阻^[4-6]是反映卷烟品质的重要物理指标,其中孔隙率直接反映卷烟密度与烟丝分布^[7];动态吸阻相较于卷烟未点燃时的静态吸阻,能更直观反映消费者的感受^[4]。卷烟生产过程中,加工参数的设定是决定卷烟品质的核心。切丝宽度、叶丝干燥(HDT)参数(蒸汽温度

收稿日期:2025-08-27;修回日期:2025-10-16;出版日期:2026-08-15

基金项目:上海烟草集团有限责任公司科技项目(K2024-2-014P);中国烟草总公司重点科技项目(110201802005)

作者简介:吴若昕(1990—),女,天津市人,上海烟草集团有限责任公司工程师,主要研究方向为烟草化学。E-mail: wuruoxin0305@163.com

通信作者: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: lixiao6712@126.com

与流量)和劈刀规格(弧长、槽深)是影响卷烟品质的重要加工参数,其中切丝宽度、HDT 参数分别为制丝工段中切丝与烘丝工序的重要加工参数,劈刀规格是卷包工段中的重要加工参数。刘赐德等^[8]研究发现,切丝宽度的增加有助于提升烟丝耐加工性、降低消耗、改善抽吸感受。王佳等^[9]研究发现随着叶丝干燥蒸汽温度的升高,卷烟舒适度有所降低,整丝率和碎丝率均先上升后下降。殷晓娟等^[10]利用雷达图法建立了一套数字化、可视化的劈刀盘健康状况方法,有效提升了卷烟品质。

目前,行业内针对卷烟加工参数影响圆周、单支重量等常规卷烟物理指标及抽吸感受的研究较为深入,但这些参数对卷烟抽吸流畅性的影响尚不明确。基于此,本研究拟建立卷烟抽吸流畅性评价方法,补充并优化烟支孔隙率评价方法^[11],研究不同切丝宽度、HDT 参数和劈刀规格这 3 种加工参数对卷烟孔隙率及其分布均匀性、轴向动态吸阻稳定性及分布一致性和抽吸流畅性的影响,并对卷烟孔隙率、动态吸阻与抽吸流畅性进行相关性分析,以期科学提升产品质量与优化产品设计提供参考。

1 材料与方法

1.1 主要材料与仪器

主要材料:不同切丝宽度、HDT 参数和劈刀规格的中支卷烟样品,均在相同生产设备上卷制,除因实验设计变更参数以外,其他原辅材料均相同,具体参数信息见表 1。

主要仪器:KBF 型恒温恒湿箱,美国 BINDER 公司;InspeXio SMX-225CT FPD HR Plus 型微焦点 X 射线 CT 系统设备,日本岛津公司;i-TDR100 型卷烟动态吸阻检测仪,郑州烟草研究院。

1.2 实验方法

1.2.1 样品预处理 将卷烟样品置于温度(22 ± 1)℃、相对湿度(60 ± 2)%的恒温恒湿箱中平衡 48 h^[12]。

1.2.2 CT 扫描实验 将预处理后的卷烟样品参照前人研究^[13]方法进行 CT 扫描实验,参数设置如下:SOD 为 51.036,SID 为 800^[11]。将烟丝段视为 1 个 ROI(感兴趣区),以卷烟燃烧端为基准,沿着纵轴以相同步长(取点 100 次)对卷烟三维模型截面进行横截面取点,卷烟截面分割示意图如图 1 所示。将卷烟 CT 扫描数据导入图像软件,通过滤波反投影三维重建技术得到的二维模型截面和三维重建模型图如图 2 所示。选取单支质量适宜的样品进行平行实验($n=3$),取平均值计算孔隙率。

表 1 不同加工参数的卷烟样品
Table 1 Cigarette samples produced under different processing parameters

组别	编号	切丝宽度/mm	HDT 参数/(℃,kg/h)	劈刀规格/mm
对照组	1	0.85	175,370	18,2.5
	2	1.00	175,370	18,2.5
处理 1	3	1.20	175,370	18,2.5
	4	0.85	178,350	18,2.5
处理 2	5	0.85	182,330	18,2.5
	6	0.85	175,370	22,2.2
处理 3	7	0.85	175,370	23,1.8

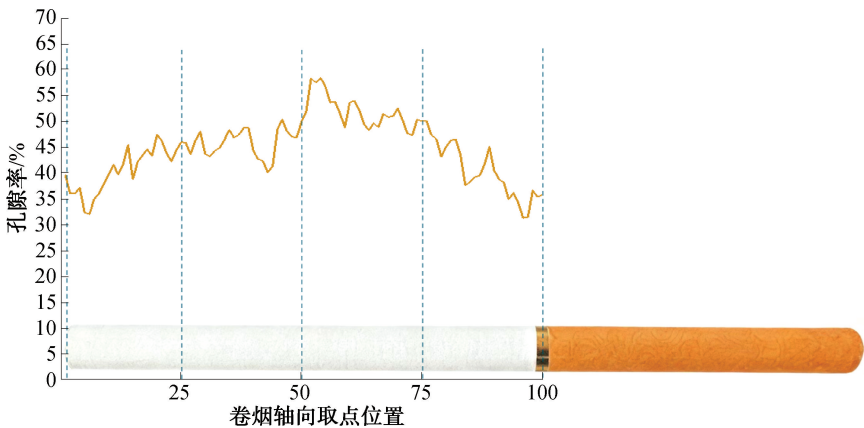


图 1 卷烟横截面分割示意图
Fig. 1 Cross-sectional segmentation diagram of a cigarette

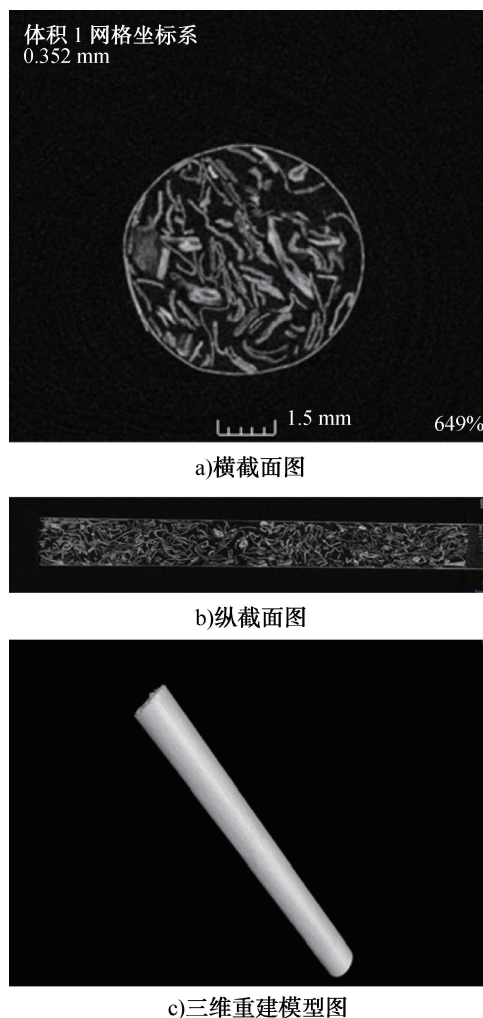


图2 卷烟二维模型截面和三维重建模型图

Fig. 2 Two-dimensional cross-section and three-dimensional reconstruction model of a cigarette

1.2.3 卷烟孔隙率计算及其分布均匀性表征 卷烟烟丝部分体积由叶丝、梗丝、膨胀烟丝、再造烟丝等物料体积和孔隙体积组成,但卷烟纸对孔隙率的影响不可忽视,不能单独认为卷烟截面孔隙率为卷烟烟丝段孔隙面积占卷烟烟丝段总面积的百分比。沿卷烟纸轮廓取点,并估算轮廓厚度,按下式计算卷烟二维截面孔隙率($\theta/\%$)。

$$\theta = \frac{S_{\text{轮廓}} - S_{\text{烟丝}} - t \times R}{S_{\text{轮廓}}} \times 100\%$$

式中, $S_{\text{轮廓}}$ 为卷烟截面轮廓面积/ mm^2 , $S_{\text{烟丝}}$ 为卷烟截面烟丝面积/ mm^2 , t 为卷烟纸轮廓厚度/ mm , R 为轮廓点数。

卷烟孔隙率($\varphi/\%$)计算公式如下:

$$\varphi = \frac{\theta}{100} \times 100\%$$

将获取的卷烟孔隙率数据参照前人研究^[4,14]进行矩阵化处理,令卷烟孔隙率矩阵 $\mathbf{A}_{m \times n} =$

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}, \text{其中 } n \text{ 为卷烟截面取点数, } m$$

为单支卷烟样品在某一取点处的横截面孔隙率。

记向量 $\mathbf{B}_{m \times 1} = (b_1, b_2, \cdots, b_m)^T$, 其中 $b_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \times \frac{1}{n}$,

a_{ij} 为第 j 支卷烟在第 i 个位置处的孔隙率, $i = 1, 2, \cdots,$

$$m; j = 1, 2, \cdots, n。 \text{ 令矩阵 } \mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \cdots & d_{mn} \end{bmatrix},$$

$\eta_j = \sum_{i=1}^n d_{ij}^2$, 其中 $d_{ij} = \frac{a_{ij} - b_i}{b_i}$, 且 d_{ij} 服从标准正态

分布 $N(0, 1)$; η_j 越小, 表明第 j 支卷烟截面孔隙率分布均匀性越适宜。

1.2.4 动态吸阻实验 在单支质量均值 $\pm 0.005 \text{ g}$ 范围内, 挑选预处理后的 20 支卷烟样品进行动态吸阻实验^[4], 并进行平行实验 ($n=5$)。卷烟静态吸阻为不点燃卷烟时的吸阻^[15], 动态吸阻为卷烟燃吸过程中的平均逐口吸阻^[5,15]。为减小误差, 卷烟抽吸口数均取 7 口/支。

1.2.5 轴向动态吸阻稳定性及分布一致性表征 轴向动态吸阻标准差能反映卷烟轴向动态吸阻稳

定性, 动态吸阻分布一致性系数 $\eta = \frac{\sum_{j=1}^n \eta_j}{m \times n}$, 表示卷

烟动态吸阻的差异性^[4], 其表征方法同卷烟孔隙率分布均匀性, 同时参考前人研究^[14,16-17]进行矩阵化处理。 η 越小, 说明卷烟动态吸阻分布一致性越好。

1.2.6 卷烟抽吸流畅性感官评价方法 根据《卷烟感官舒适性评价方法》(YC/T496—2014)^[18], 统计并记录每位评吸员通过评吸选定卷烟样品所提出的与抽吸流畅性相关的描述词及词频, 将收集到的描述词按同义或近义词合并, 参考文献^[19], 对

获得的各描述词使用数字 0~5 进行感官强度标度。运用几何平均值(M)将描述词初步分级,具体公式如下:

$$M = \sqrt{F \times I}$$

式中, F 为描述词实际被述及次数占该描述词所有可能被述及次数的百分比, I 为评价小组实际给出某个描述词的强度占该描述词最大可能强度的百分比。

根据 M 大小,去除一些数值相对较低的描述词,结合相关文献,选取抽吸阻力、香气量、烟气浓度、均匀性、劲头和干净程度作为评价抽吸流畅性的 6 项指标,采用 CRITIC^[19-21] 与层次分析^[22-23] 组合赋权法^[24-25] 确定单项指标权重。卷烟抽吸流畅性总分为 100 分,打分表设计见表 2。

组织 9 名专家对预处理后的卷烟样品进行评吸,各项指标以 0.5 分为记分单位,按下式计算各单项指标平均分,结果保留至两位小数。

$$\bar{X}_i = \frac{\sum X_i}{N}$$

式中, $\bar{X}_i$ 为某单项指标平均分, X_i 为某单项指标得分, N 为评吸员人数。

1.2.7 卷烟抽吸流畅性评分信度评价方法 对 9 位评吸专家的打分采用组内相关系数法进行一致性检验,ICC 值是指对于专家评吸打分一致性的评价。ICC 值范围为 0~0.50 表明一致性较差,0.50~0.75 表明一致性中等,0.75~0.90 表明一致性较好,≥0.90 表明一致性极好。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 加工参数对卷烟孔隙率的影响

2.1.1 不同加工参数卷烟孔隙率分布规律 卷烟

孔隙率及其分布均匀性反映了卷烟密度与卷烟内部烟丝分布情况。沿卷烟燃烧端至接嘴端方向,按轴向取点位置将卷烟平均分为 4 段(N1—N4),不同加工参数处理的卷烟样品轴向平均横截面孔隙率分布如图 3 所示。由图 3 可知,以燃烧端为起始点,各卷烟样品横截面孔隙率均呈先减小后增大再减小的变化趋势。从 N2 到 N3,孔隙率增大,且均在 N3 段轴向位置达到最大值。这可能是制造过程中为平衡卷烟燃烧性和抽吸感受而形成的一种优化密度梯度分布。由于燃烧端需要紧头以保证燃烧稳定性,滤嘴端需要较高的卷烟密度以保证连接强度,而卷烟中部区域在满足整体性能适宜的前提下,卷烟密度设计值相对较低,表现为该卷烟段孔隙率明显升高。

2.1.2 加工参数对卷烟横截面孔隙率及分布均匀性的影响 孔隙率及 η 越小,卷烟密度越大,烟丝分布均匀性越好。取点位置为 100 时,卷烟轴向横截面孔隙率及其 η 如图 4 所示。由图 4 可知,不同加工参数卷烟横截面孔隙率均符合正态分布,整体在 30%~60% 范围内波动,在 95% 置信区间内不存在明显异常值。在不同切丝宽度下,随切丝宽度增加,卷烟孔隙率先增大后减小、 η 逐渐增大。这可能是由于随着切丝宽度由 0.85 mm 增加至 1.00 mm,烟丝在卷制过程中更不易弯曲变形,难以紧密填充卷烟内部空间,导致烟丝间形成更大的孔隙,而随切丝宽度增加至 1.20 mm,较宽的烟丝在风力送丝和卷制工序更不易受气流扰动。由于较细烟丝(0.85 mm)的柔性更强,在相同卷制压力下更易贴合与交错堆叠,因此切丝宽度 0.85 mm 的卷烟填充密度更高、卷烟孔隙率分布均匀性更好。HDT 参数中,高蒸汽温度和低蒸汽流量导致烟丝瞬时脱水速率加快,内部纤维素和果胶质脆化使得卷制过程中烟丝断裂增多,填充时易形成局部孔隙;烟丝脆性增加导致输送过程中造碎增多,卷制成型时振动促使烟支轴

表 2 卷烟抽吸流畅性打分表
Table 2 Scoring table for cigarette smoking smoothness

编号	指标	抽吸阻力	香气量	烟气浓度	均匀性	劲头	干净程度	卷烟抽吸流畅性
	单项指标最高分/分	30	21	13	11	10	15	100
1								
2								
感官描述:								

注:抽吸阻力、烟气浓度和劲头除打分外需注明偏大、偏小或适中。

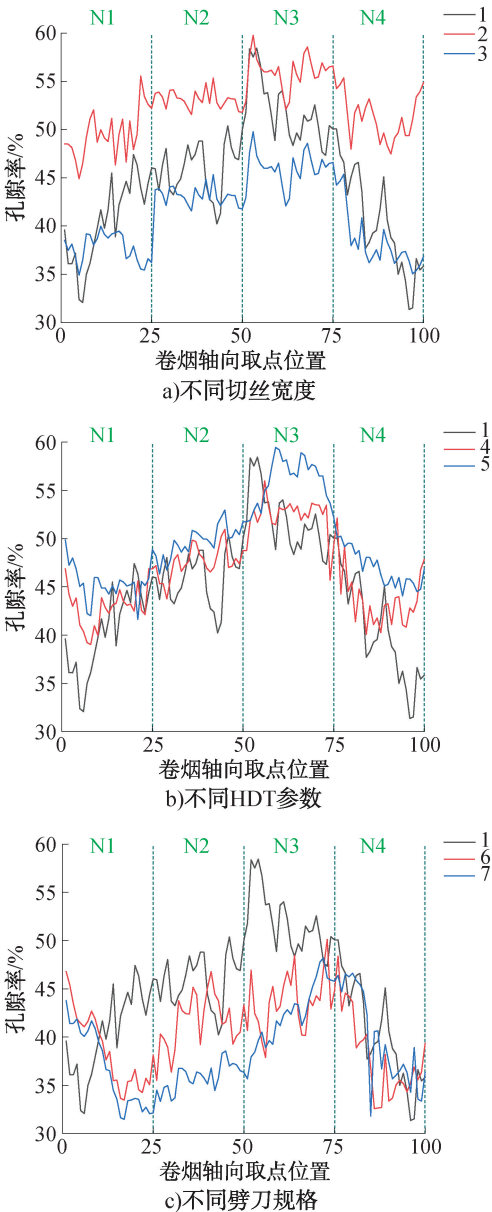


图 3 不同加工参数处理的卷烟样品轴向平均横截面孔隙率分布

Fig. 3 Axial average cross-sectional porosity distribution of cigarette samples treated under different processing parameters

向烟丝分布不均,具体体现在随处理 2 的 HDT 蒸汽温度上升和蒸汽流量下降,烟支孔隙率增大且其分布均匀性降低。劈刀规格的改变使卷烟孔隙率及其分布均匀性呈现不同的变化:弧长增大使劈刀内烟丝堆积量增加,槽深减小使烟丝回弹率上升,使得卷烟烟丝局部密度增大但整体压实不足,因此卷烟孔隙率呈减小的变化趋势;此外,22 mm 与 23 mm 的弧长均使得在气流干扰下的长丝分布方向不一

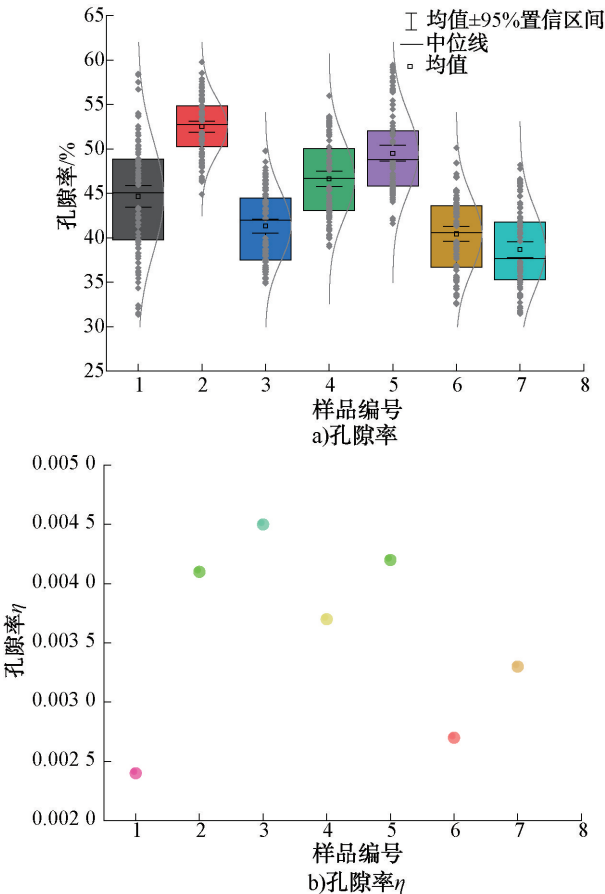


图 4 卷烟轴向横截面孔隙率及其 η
Fig. 4 Axial average cross-sectional porosity and η of cigarettes

致,2.2 mm 与 1.8 mm 的槽深不足以矫正此现象,因此卷烟轴向孔隙率分布均匀性变差。

2.2 加工参数对卷烟动态吸阻的影响

2.2.1 加工参数对卷烟吸阻及动静比的影响 卷烟吸阻及动静比如图 5 所示。由图 5 可知,随切丝宽度增加,卷烟吸阻先增加再减小。前人研究^[4]表明,切丝宽度(0.9~1.3 mm)的增加会使卷烟内部烟丝孔隙增加,进而降低其动态吸阻。而本研究设定了包括 0.9 mm 以下的切丝宽度,对本研究范围而言,不同切丝宽度卷烟的吸阻值与动静比均随切丝宽度增加呈先增大后减小的变化趋势。这可能是因为宽度较小的烟丝(0.85 mm)交错堆叠使得气流通路曲折而截面积稳定,随着切丝宽度增加到 1.0 mm,烟丝刚性增强使其难以弯曲而填充孔隙,从而减小气流通路截面积;而随切丝宽度增加至 1.2 mm,卷烟空隙率增大,表现为随切丝宽度增加,

卷烟静态吸阻与动态吸阻均呈先增大后减小的变化趋势;同时,由于受到卷烟燃吸时的高温影响,气流更易通过卷烟段,因此动静比也随之增大。HDT参数中,蒸汽温度增加与蒸汽流量降低使烟丝易脱水脆化而增加造碎,卷烟孔隙率增大,使静态吸阻与动态吸阻均减小;而动态吸阻的高温气流更易冲破碎烟末,因此高温低湿的 HDT 参数下,卷烟的静态吸阻、动态吸阻与动静比均减小。随劈刀弧长增加、槽深减小,卷烟烟丝密度增大,静态吸阻与动态吸阻相应增加;卷烟点燃状态下的动态吸阻除受烟丝的阻力之外,还受热气流膨胀、烟气气溶胶等因素影响,因此动静比也增大。

2.2.2 加工参数对卷烟轴向动态吸阻稳定性及分布一致性的影响 卷烟轴向动态吸阻稳定性及其 η 如图 6 所示。由图 6 可知,增加切丝宽度,卷烟轴向动态吸阻稳定性及分布一致性均减弱;随 HDT 蒸汽温度升高与蒸汽流量降低,轴向动态吸阻稳定性减弱, η 减小,说明卷烟间动态吸阻分布一致性变好;劈刀弧长增加与槽深减小使得轴向动态吸阻稳定性增强,卷烟间动态吸阻分布一致性先增强后减弱。

2.3 加工参数对卷烟抽吸流畅性的影响

2.3.1 卷烟抽吸流畅性评分信度评价 卷烟抽吸流畅性专家打分一致性结果见表 3。由表 3 可知,9 位评吸专家对卷烟抽吸流畅性打分一致性均较好 (ICC 值>0.75, $P<0.01$),对 6 项指标打分一致性均为中等及以上 (ICC 值 ≥ 0.50 , $P<0.01$)。

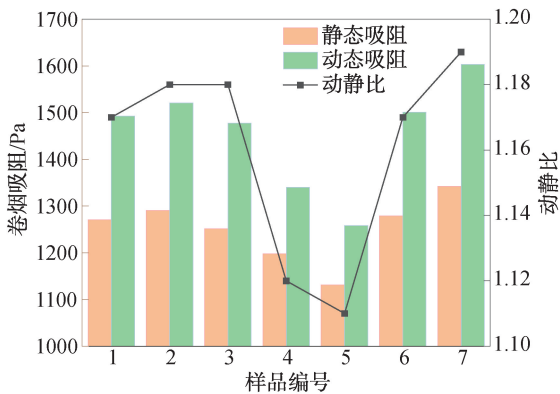


图 5 卷烟吸阻及动静比

Fig. 5 Draw resistance and dynamic-to-static ratio of cigarettes

2.3.2 卷烟抽吸流畅性评价结果方差分析 卷烟抽吸流畅性评价结果方差分析^[26]见表 4。由表 4 可知,与对照组相比,切丝宽度的增加使卷烟抽吸流畅性明显变差。随切丝宽度的增加,除均匀性和劲头之外,其余 4 项指标均与对照组差异显著,表现为抽吸时香气更加丰满,但阻力与烟气浓度偏大、口腔残留干净程度变差。高温低湿的 HDT 参数能显著改善卷烟抽吸流畅性。蒸汽温度升高、蒸汽流量降低对卷烟抽吸流畅性的改变体现在抽吸阻力更适宜、干净程度明显变好,但香气量因烟气浓度的增加而被掩盖。劈刀规格的改变对卷烟整体抽吸流畅性影响不显著。抽吸阻力、香气量、烟气浓度与均匀性均与对照组卷烟得分基本持平,但干净程度明显变好,抽吸时显著增加的劲头更符合大众需求。因此,卷烟抽吸流畅性因切丝宽度增加而明显变差,HDT 蒸汽温度升高、蒸汽流量降低显著改善抽吸流畅性,而劈刀规格的改变对抽吸流畅性无显著影响。

2.4 卷烟孔隙率、动态吸阻与抽吸流畅性的相关性分析

不同加工参数下卷烟质量指标 (动态吸阻、动态吸阻分布一致性、孔隙率和孔隙率分布均匀性) 与抽吸流畅性的相关性分析结果如图 7—图 9 所示,其中 * 表示 $P\leq 0.05$, ** 表示 $P\leq 0.01$, *** 表示 $P\leq 0.001$ 。由图 7 可知,在不同切丝宽度下,卷烟抽吸流畅性与孔隙率、孔隙率分布均匀性之间均存在极显著正相关关系 ($P\leq 0.001$),与动态吸阻之

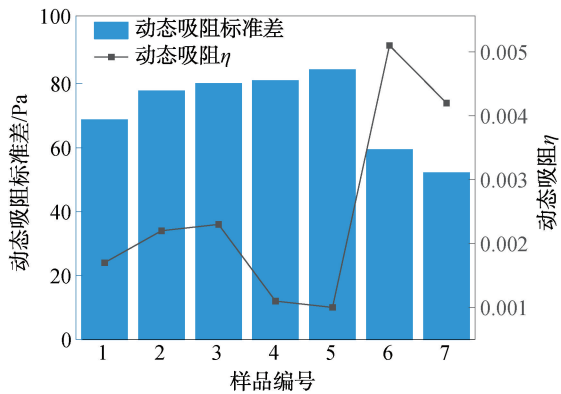


图 6 卷烟轴向动态吸阻稳定性及其 η

Fig. 6 Axial stability and η of dynamic draw resistance of cigarettes

表 3 卷烟抽吸流畅性专家打分一致性结果
Table 3 Consistency of expert scoring for cigarette smoking smoothness

评吸专家 编号	ICC 值						
	抽吸阻力	香气量	烟气浓度	均匀性	劲头	干净程度	抽吸流畅性
1 [#]	0.846	0.845	0.837	0.890	0.882	0.872	0.894
2 [#]	0.798	0.844	0.816	0.824	0.812	0.817	0.842
3 [#]	0.912	0.891	0.903	0.867	0.896	0.868	0.905
4 [#]	0.847	0.813	0.824	0.832	0.874	0.839	0.878
5 [#]	0.901	0.895	0.882	0.880	0.890	0.894	0.893
6 [#]	0.897	0.915	0.860	0.863	0.884	0.875	0.875
7 [#]	0.833	0.806	0.847	0.843	0.878	0.869	0.852
8 [#]	0.905	0.879	0.908	0.878	0.881	0.913	0.915
9 [#]	0.856	0.869	0.892	0.901	0.883	0.878	0.871

表 4 卷烟抽吸流畅性打分结果方差分析
Table 4 Analysis of variance of cigarette smoking smoothness scores

样品编号	抽吸阻力	香气量	烟气浓度	均匀性	劲头	干净程度	抽吸流畅性
1	26.00 ^b	16.00 ^b	10.00 ^b	9.00 ^{ab}	7.00 ^b	12.00 ^b	80.00 ^b
2	21.27 ^c	17.20 ^a	7.78 ^c	8.75 ^b	7.00 ^b	9.75 ^c	71.74 ^c
3	21.45 ^c	17.35 ^a	7.56 ^c	8.65 ^b	7.15 ^b	9.40 ^c	71.56 ^c
4	29.00 ^a	15.13 ^c	11.67 ^a	10.22 ^a	8.50 ^{ab}	13.75 ^a	88.27 ^a
5	29.18 ^a	15.00 ^c	12.36 ^a	10.50 ^a	8.50 ^{ab}	14.00 ^a	89.54 ^a
6	25.55 ^b	16.35 ^b	10.60 ^b	10.00 ^{ab}	9.00 ^a	9.00 ^c	80.50 ^b
7	25.00 ^b	16.40 ^b	10.52 ^b	9.85 ^{ab}	9.20 ^a	9.00 ^c	79.97 ^b

注：同列不同上标小写字母代表组间存在显著差异 ($P<0.05$)。

间存在极显著负相关关系 ($P\leq0.001$)，与轴向动态吸阻稳定性及分布一致性不存在相关性。由图 8 可知，不同 HDT 参数下，卷烟抽吸流畅性与孔隙率、孔隙率分布均匀性及动态吸阻之间均存在极显著负相关关系 ($P\leq0.001$)，与轴向动态吸阻稳定性及分布一致性不存在相关性。由图 9 可知，不同劈刀规

格下，卷烟抽吸流畅性与孔隙率分布一致性及动态吸阻之间均存在极显著正相关关系 ($P\leq0.001$)，与孔隙率、轴向动态吸阻稳定性及分布一致性不存在相关性。综上，不同加工参数下，孔隙率分布均匀性与动态吸阻均能极显著影响卷烟抽吸流畅性。

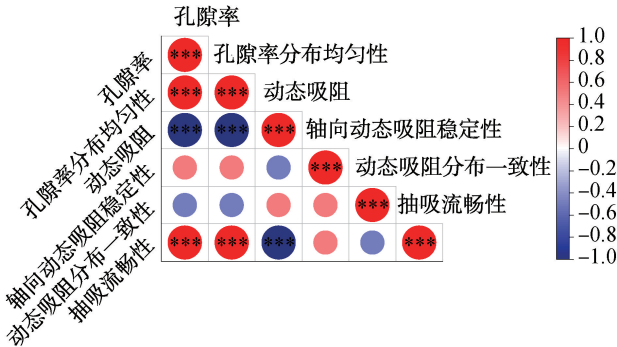


图 7 不同切丝宽度卷烟质量指标与抽吸流畅性相关性分析
Fig. 7 Correlation analysis between cigarette quality indicators and smoking smoothness under different cutting widths

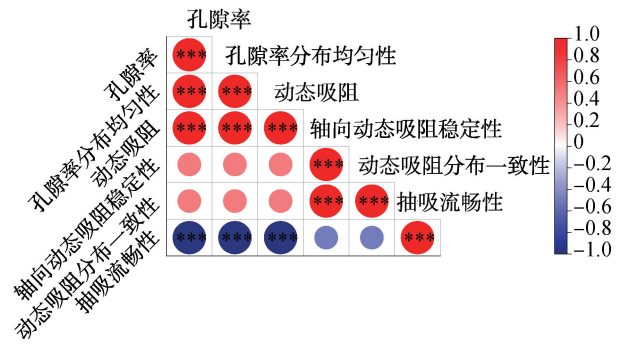


图 8 不同 HDT 参数卷烟质量指标与抽吸流畅性相关性分析
Fig. 8 Correlation analysis between cigarette quality indicators and smoking smoothness under different HDT parameters

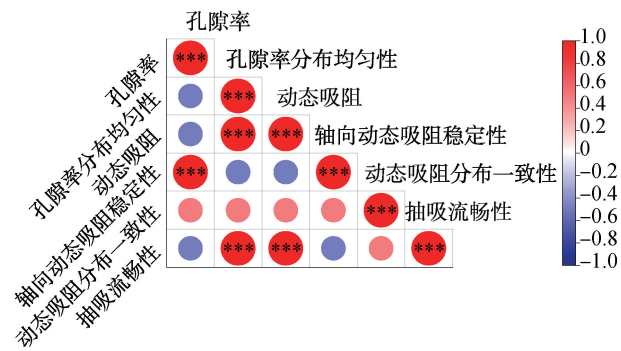


图9 不同劈刀规格卷烟质量指标与抽吸流畅性相关性分析

Fig. 9 Correlation analysis between cigarette quality indicators and smoking smoothness under different knife specifications

3 结论

本研究采用微焦点 X 射线 CT 扫描、动态吸阻检测及感官评价等方法,结合 CRITIC-层次分析组合赋权法,以切丝宽度、HDT 参数、劈刀规格为单因素变量,明确加工参数通过影响卷制质量指标(动态吸阻、轴向动态吸阻稳定性、动态吸阻分布一致性、孔隙率和孔隙率分布均匀性),进而对卷烟抽吸流畅性的影响规律,结论如下:1)通过考量微焦点 X 射线 CT 扫描时的卷烟纸厚度,可使烟支孔隙率表征方法更为精确。2)以燃烧端为轴向起始点,不同加工参数的卷烟横截面孔隙率均呈现先减小后增大再减小的变化趋势,且均在 75% 卷烟段位置达到最大值。3)加工参数对各项卷烟质量指标影响显著:随切丝宽度增加,卷烟孔隙率先增大后减小,孔隙率分布均匀性、轴向动态吸阻稳定性与其分布一致性均下降;随 HDT 蒸汽温度升高、蒸汽流量降低,卷烟孔隙率与动态吸阻分布一致性均增大,孔隙率分布均匀性与轴向动态吸阻稳定性均下降;随劈刀弧长增加与槽深减小,卷烟孔隙率及其分布均匀性均减小,轴向动态吸阻稳定性上升,而其分布一致性先降低后升高。4)加工参数对卷烟抽吸流畅性及其各项指标的影响不同:随切丝宽度的增加显著变差,抽吸阻力与烟气浓度偏大,口腔残留干净程度变差;随 HDT 蒸汽温度升高、蒸汽流量降低得到显著改善,抽吸阻力更适宜、干净程度明显变好;劈

刀规格的改变对其无显著影响。5)相关性分析显示:改变切丝宽度参数、HDT 参数的卷烟抽吸流畅性均与动态吸阻、孔隙率及其分布均匀性极显著正相关($P \leq 0.001$);改变劈刀规格的卷烟抽吸流畅性与动态吸阻、孔隙率分布均匀性极显著正相关($P \leq 0.001$)。综上,本研究明确了加工参数对抽吸流畅性的影响、优化了孔隙率表征方法,为中支卷烟加工参数调控及品质提升提供了理论与技术参考。下一步将探究多加工参数交互作用,结合烟丝微观结构进一步揭示影响机理,为工艺优化提供更全面参考。

参考文献:

[1] 木子. 大品牌的双翼——高品质与真特色[N]. 东方烟草报,2012-03-09(6).
MU Z. The two wings of big brands:High quality and true characteristics[N]. Oriental Tobacco News,2012-03-09(6).

[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.
LU P,CHU W J,CUI C,et al. Effect of filling state of cut tobacco on rolling quality and ash integrity of cigarette[J]. Journal of Light Industry,2023,38(5):68-73,82.

[3] 刘新民,杜咏梅,程森,等. 烤烟烟丝填充值与其理化指标和感官品质的关系[J]. 中国烟草科学,2012,33(5):74-78.
LIU X M,DU Y M,CHENG S,et al. Relationship between filling power and major indices of physical feature and chemical components and sensory quality of cut tobacco[J]. Chinese Tobacco Science,2012,33(5):74-78.

[4] 李超,李陈巧,郭国宁,等. 卷烟动态吸阻及稳定性影响因素分析[J]. 烟草科技,2023,56(11):87-93.
LI C,LI C Q,GUO G N,et al. Factors affecting cigarette dynamic draw resistance and its stability[J]. Tobacco Science & Technology,2023,56(11):87-93.

[5] 刘欢,王乐,胡少东,等. 卷烟燃烧动态吸阻研究[J]. 食品与机械,2017,33(5):83-86.
LIU H,WANG L,HU S D,et al. Study on dynamic suction resistance of cigarette during combustion[J]. Food & Machinery,2017,33(5):83-86.

[6] 王乐,邓国栋,吴钊,等. 基于线性网络模型的卷烟逐口动态吸阻与动态通风率的关系[J]. 烟草科技,2022,55(5):66-72.
WANG L,DENG G D,WU Z,et al. Relationship between puff-by-puff dynamic draw resistance and ventilation of

- cigarette based on linear network model [J]. Tobacco Science & Technology, 2022, 55(5): 66-72.
- [7] 曾劲松, 杜亮, 唐大荣. 不同烟丝透气度和吸压下卷烟烟气流动的数值模拟[J]. 造纸科学与技术, 2017, 36(4): 44-49, 53.
- ZENG J S, DU L, TANG D R. Numerical simulation of smoke flow in different cut tobacco breathability and suction pressure[J]. Paper Science & Technology, 2017, 36(4): 44-49, 53.
- [8] 刘赐德, 陈康, 梁佳欣, 等. 切丝宽度对烟丝关键物理特性影响的研究[J]. 农产品加工, 2025(8): 21-27.
- LIU C D, CHEN K, LIANG J X, et al. Study on the influence of cutting width on key physical properties of tobacco cuttings [J]. Agricultural Products Processing, 2025(8): 21-27.
- [9] 王佳, 唐国庆, 冷晓飞. HDT 气流烘丝机关键加工参数对卷烟感官质量、物理指标的影响[J]. 中国设备工程, 2023(5): 88-90.
- WANG J, TANG G Q, LENG X F. The influence of key processing parameters of HDT air flow drying machine on the sensory quality and physical indicators of cigarettes [J]. China Plant Engineering, 2023(5): 88-90.
- [10] 殷晓娟, 殷晓露, 黄智, 等. 基于雷达图法的卷烟机劈刀盘健康状况评估[J]. 中国新技术新产品, 2024(8): 68-71.
- YIN X J, YIN X L, HUANG Z, et al. Evaluation of the health status of cigarette cutter blades based on radar chart method [J]. New Technology & New Products of China, 2024(8): 68-71.
- [11] 赵鑫, 刘朝贤, 朱文魁, 等. 基于微焦点 CT 的烟支内部孔隙率检测[J]. 烟草科技, 2024, 57(5): 75-82.
- ZHAO X, LIU C X, ZHU W K, et al. Detection of tobacco rod porosity inside a cigarette using microfocus computerized tomography [J]. Tobacco Science & Technology, 2024, 57(5): 75-82.
- [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] 邓国栋, 赵鑫, 朱文魁, 等. 一种烟支中烟丝分布的检测方法: CN116797593A[P]. 2023-09-22.
- DENG G D, ZHAO X, ZHU W K, et al. A detection method for tobacco shreds distribution in cigarettes: CN116797593A[P]. 2023-09-22.
- [14] 游敏, 付金存, 王远, 等. 烟丝形态特性与细支卷烟填充密度均匀性关系研究[J]. 轻工学报, 2025, 40(1): 75-81.
- YOU M, FU J C, WANG Y, et al. Study on the relationships between morphological characteristics of cut tobacco and the uniformity of the filling density of slim cigarettes[J]. Journal of Light Industry, 2025, 40(1): 75-81.
- [15] 叶鸿宇, 许峰, 张建中, 等. 成丝工艺参数对梗丝结构和卷烟吸阻稳定性的影响[J]. 烟草科技, 2013, 46(11): 11-14.
- YE H Y, XU F, ZHANG J Z, et al. Influence of processing parameters on cut stem structure and draw resistance stability of cigarettes[J]. Tobacco Science & Technology, 2013, 46(11): 11-14.
- [16] 杨松潭, 银芳, 韩启立, 等. 卷烟燃烧过程中各项动态指标的检测分析现状与展望[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(27): 154-157.
- YANG S T, YIN F, HAN Q L, et al. Current situation and prospect of detection and analysis of various dynamic indicators during cigarette combustion [J]. Technology Innovation and Application, 2024, 14(27): 154-157.
- [17] 申晓锋, 李华杰, 李善莲, 等. 烟丝结构表征方法研究[J]. 中国烟草学报, 2010, 16(2): 20-25.
- SHEN X F, LI H J, LI S L, et al. Study on characterization of cut tobacco particle size distribution [J]. Acta Tabacaria Sinica, 2010, 16(2): 20-25.
- [18] YC/T 496—2014 卷烟 感官舒适性评价方法[S].
- YC/T 496—2014 Cigarette—The sensory comfort evaluation methods[S].
- [19] 贺莹, 赵中秋, 梅振然, 等. 基于 CRITIC 客观赋权法的三江源国家公园生态敏感性评价[J]. 环境科学, 2025, 46(8): 5156-5168.
- HE Y, ZHAO Z Q, MEI Z R, et al. Ecological sensitivity evaluation of Three-River-Source National Park based on CRITIC objective weighting method [J]. Environmental Science, 2025, 46(8): 5156-5168.
- [20] 李慕颜, 叶茵, 陈杰, 等. 模糊评价方法在云产卷烟感官评价中的应用研究[J]. 新型工业化, 2020, 10(5): 117-120.
- LI M Y, YE Y, CHEN J, et al. Study on application of fuzzy evaluation method in sensory evaluation of cloud-produced cigarettes [J]. The Journal of New Industrialization, 2020, 10(5): 117-120.
- [21] 龙林健, 陈星明, 刘传举, 等. 基于 Critic 赋权法的隔离矿柱安全厚度优选研究[J]. 化工矿物与加工, 2021, 50(3): 1-5.
- LONG L J, CHEN X M, LIU C J, et al. Research on optimization of safety thickness of isolation pillar based on Critic weighting method [J]. Industrial Minerals & Processing, 2021, 50(3): 1-5.
- [22] 郭霄汉, 唐朝华, 陈壮宇, 等. 基于层次分析法的打叶复烤生产过程质量评估[J]. 中国设备工程, 2022(20): 129-131.
- GUO X H, TANG C H, CHEN Z Y, et al. Quality evaluation of threshing and redrying production process based on analytic hierarchy process [J]. China Plant Engineering, 2022(20): 129-131.
- [23] 吴春雷, 刚旭, 黄卓娅. 基于层次分析的评价权值计算模

型研究与应用[J]. 微型电脑应用,2012,28(4):28-31.

WU C L,GANG X,HUANG Z Y. Study and application of evaluation weight calculation model based on analytic hierarchy process[J]. Microcomputer Applications,2012,28(4):28-31.

[24] 张娇,蒋倩倩,张伯言,等. 基于 AHP-CRITIC 法正交优选乌甘袋泡茶提取工艺及抗炎作用研究[J]. 中草药,2020,51(8):2177-2184.

ZHANG J,JIANG Q Q,ZHANG B Y, et al. Study on extraction process and anti-inflammatory effect of Wugan tea based on AHP-CRITIC analysis [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs,2020,51(8):2177-2184.

[25] 吕富强. 基于动态加权组合模型的地表点云孔洞修补应用研究[D]. 桂林:桂林理工大学,2023.

LU F Q. Application research of surface point cloud hole repair based on dynamic weighted combination model [D]. Guilin:Guilin University of Technology,2023.

[26] 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.

Effects of processing parameters on cigarette smoking smoothness

WU Ruoxin¹,WANG Yu²,WANG Jialiang¹,LIU Chao¹,ZHANG Chuntao¹,WANG Jiale¹,GUO Ziyang²,LI Xiao²

1. Tianjin Cigarette Factory,Shanghai Tobacco Group Co.,Ltd.,Tianjin 300163,China;

2. College of Tobacco Science and Engineering,Zhengzhou University of Light Industry,Zhengzhou 450001,China

Abstract: [Objective] This study aimed to investigate the effects of cigarette porosity and dynamic draw resistance on smoking smoothness under different processing parameters, including cutting width, cut tobacco drying (HDT) parameters (steam temperature and flow rate), and knife specifications (arc length and groove depth). **[Methods]** Cigarette porosity was measured using microfocus X-ray computed tomography(CT), and the porosity characterization method was improved. The axial stability and distribution consistency of dynamic draw resistance were evaluated by the standard deviation of dynamic draw resistance between cigarettes and the distribution consistency coefficient (η). An evaluation method for cigarette smoking smoothness was established using a combined CRITIC-analytic hierarchy process (AHP) weighting approach. **[Results]** Within the experimental range: 1) Taking the cigarette paper into account during CT scanning improved the accuracy of porosity characterization. 2) With increasing cutting width, cigarette porosity first increased and then decreased (maximum at 1.00 mm), while the uniformity of porosity distribution gradually declined; both the axial stability and distribution consistency of dynamic draw resistance decreased. As the HDT steam temperature increased and the steam flow rate decreased, cigarette porosity increased, porosity distribution uniformity decreased, axial dynamic draw resistance stability declined, and distribution consistency increased. With increasing knife arc length and decreasing groove depth, both porosity and its distribution uniformity decreased; axial dynamic draw resistance stability improved, and distribution consistency first decreased and then increased, with the best consistency observed at an arc length of 18 mm and a groove depth of 2.5 mm. 3) Cigarette smoking smoothness significantly deteriorated as cutting width increased, was significantly improved by higher HDT steam temperature and lower steam flow rate, and was not significantly affected by changes in knife specifications. 4) Under different processing parameters, both the uniformity of porosity distribution and the dynamic draw resistance had highly significant effects on cigarette smoking smoothness. **[Conclusion]** Within a certain range, increasing the HDT steam temperature and decreasing the steam flow rate improved cigarette smoking smoothness, whereas increasing the cutting width had a detrimental effect.

Key words: cigarette; processing parameters; porosity; dynamic draw resistance; smoking smoothness

[责任编辑:杨晓娟 刘春奎]