

卷烟材料参数对细支卷烟主流烟气 氢氰酸释放量的影响

吴金凤¹, 戴亚¹, 庄亚东², 陈昆燕¹,
尚军¹, 兰中于¹, 汪长国¹

1. 重庆中烟工业有限责任公司 技术中心, 重庆 400060;

2. 江苏中烟工业有限责任公司 技术研发中心, 南京 210019

摘要: 为研究细支卷烟主流烟气氢氰酸释放量受不同卷烟材料参数, 即卷烟纸透气度(X_1)、接装纸透气度(X_2)、成型纸透气度(X_3)和滤嘴丝束规格(X_4)的影响, 运用均匀设计实验制备了不同材料组合的实验卷烟样品, 采用二次多项式逐步回归法, 建立细支卷烟主流烟气氢氰酸释放量与不同材料参数的数学模型, 再对模型进行主效应分析、单因素效应分析、边际效应分析, 并进一步开展参数优化和实验验证, 明确了以上 4 种卷烟材料参数对细支卷烟主流烟气中氢氰酸释放量的影响。结果表明: ① 4 种卷烟材料对氢氰酸释放量影响的大小顺序依次为 $X_2 > X_4 > X_1 > X_3$; ② 接装纸透气度 X_2 、卷烟纸透气度 X_1 和滤嘴丝束规格 X_4 的交互与细支卷烟主流烟气氢氰酸释放量呈负相关, 接装纸透气度 X_2 的平方、成型纸透气度 X_3 和滤嘴丝束 X_4 的交互作用与细支卷烟主流烟气氢氰酸释放量呈正相关; ③ 细支卷烟主流烟气氢氰酸释放量较低的材料参数组合为卷烟纸透气度为 100 CU、接装纸透气度为 800 CU、成型纸透气度为 6 000 CU、滤嘴丝束规格为 6.0 Y/17000; ④ 与实验组的最低值相比, 氢氰酸释放量降低了 40.31%。

关键词: 细支卷烟; 均匀设计法; 氢氰酸; 材料组合

中图分类号: S572

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2020)01-0037-07

相对常规卷烟而言, 细支卷烟具有烟支圆周小、焦油量低、烟支较长等特点。近年来, 细支卷烟成为一个新的消费热点, 国内各大卷烟品牌都推出了自己的细支烟产品。关于细支卷烟的研究主要集中在烟机的设计与改造^[1-5], 烟支圆周、质量、长度、吸阻、总通风率等物理指标对细支卷烟物理品质稳定性的影响^[6-7], 制丝工艺对细支卷烟品质稳定性和主流常规烟气的影响^[8-10]等方面。然而, 目前国内有关细支卷烟材料组配对主流烟气有害成分释放量的影响研究较少, 其对细支卷烟主流烟气中 7 种有害成分^[11]之一的氢氰酸释放量的影响尚未检索到相关文献报道。因此, 本文采用现代统计方法, 结合生产实际情况系统地研究了卷烟纸、接装纸和成型纸的透气度, 滤嘴丝束规格等不同卷烟材料组配对细支卷烟主流烟气中氢氰酸释放量的影响, 旨在为低危害细支卷烟材料参数的合理组配使用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

1.1.1 材 料

不同透气度的 5 种卷烟纸、5 种接装纸、5 种成型纸, 不同规格的 3 种滤嘴丝束. 由于烟用醋纤丝束规格通常表示为单丝线密度/总丝线密度, 导致在实验数据处理时无法作为单一指标来进行量化, 因此本文在数据处理时统一采用丝束纵向表面积等效描述指数 I 来代替^[12], 即 $I = \text{总丝线密度} / \sqrt{\text{单丝线密度}}$. 辅材均由重庆中烟工业有限责任公司提供. 某牌号烤烟型叶组配方烟丝(重庆中烟工业有限责任公司提供).

1.1.2 试 剂

氢氧化钠(HPLC 级, 北京迪马科技有限公司); 邻苯二甲酸氢钾(HPLC 级, 天津市富宇精细化工有限公司); 异烟酸(百灵威试剂公司); 氰化钾(HPLC 级, 天津市恒兴化学试剂有限公司).

1.1.3 仪 器

RM20H/CS 转盘式吸烟机(德国 Borgwaldt 公司); HY-8 旋转震荡器(上海福玛设备有限公司); PL203 电子分析天平[感量: 0.0001 g, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司]; Milli-Q 超纯水系统仪(美国 Millipore 公司); SKALAR 流动分析仪(荷兰, SKALAR 公司).

1.2 方 法

1.2.1 细支卷烟卷制

按照实验设计进行实验时, 除表 1 中考察的因素外, 烟丝及其余的卷制参数保持一致; 卷制的烟支圆周长为 (17.0 ± 0.2) mm、硬度 $[(60.0 \sim 65.0) \pm 12.0]\%$ 及单支质量 $[(0.50 \sim 0.52) \pm 0.05]$ g 均在规定的允许误差范围内使用.

1.2.2 氢氰酸的检测

依据行业标准 YC/T 253-2008^[13], 用连续流动分析法检测细支卷烟主流烟气中氢氰酸的释放量.

1.2.3 实验设计

以细支卷烟卷接材料卷烟纸透气度(X_1)、接装纸透气度(X_2)、成型纸透气度(X_3)、滤嘴丝束规格(X_4)为考察因素^[14], 以氢氰酸释放量为指标, 采用“基于均匀设计的计算机辅助设计”设计实验方案^[15-16], 其因素及水平见表 1.

表 1 实验因素与水平

因 素	水 平				
	1	2	3	4	5
卷烟纸, X_1 (CU)	50	60	70	80	100
接装纸, X_2 (CU)	200	400	600	800	1 000
成型纸, X_3 (CU)	6 000	10 000	16 000	20 000	26 000
滤嘴丝束 X_4	规格	8 Y/15000	7.5 Y/16000	6 Y/17000	
	I	5 303.3	5 842.37	6 940.22	

注: * 透气度单位 CU 为 $\text{cm}^3/(\text{min} \cdot \text{cm}^2)$ 的缩写.

1.2.4 数据处理

使用 SPSS 和 DPS 统计分析软件, 以卷烟主流烟气中氢氰酸释放量为因变量, 采用二次多项式逐步回归建立模型, 并进行检验; 采用文献[17]的方法计算各要素的贡献率; 运用基于实际参数的极值寻优方法和综合平衡法^[18-21], 得到主流烟气氢氰酸释放量较低的参数优化组合, 并进行验证.

2 结果与分析

2.1 实验结果

根据表 1 设计的实验因素及水平, 使用不同参数指标的材料卷制了 6 组样品, 每组实验样品进行 3 次重复测定并取其平均值(表 2). 由于各因素的量纲和数量级不一致, 为便于统计分析, 采用极差归一化变换^[22]对实验设计的各因素水平进行变换, 即各因素水平的变换值 $C = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$, 实验检测结果见表 2.

表 2 不同卷烟材料参数下卷制的样品氢氰酸释放量

样品号	卷烟纸(X_1)	接装纸(X_2)	成型纸(X_3)	滤嘴丝束(X_4)	氢氰酸/ $(\mu\text{g} \cdot \text{支}^{-1})$
XZB-1	0.000 0	1.000 0	0.200 0	0.329 3	61.11
XZB-2	0.200 0	0.250 0	1.000 0	0.000 0	77.53
XZB-3	0.400 0	0.000 0	0.000 0	0.329 3	91.67
XZB-4	0.400 0	0.500 0	0.700 0	1.000 0	61.24
XZB-5	0.600 0	0.500 0	0.500 0	1.000 0	51.77
XZB-6	1.000 0	0.750 0	0.500 0	0.000 0	60.07

依据表 2 的检测结果, 统计描述结果见表 3.

表 3 样品主流烟气中氢氰酸释放量的统计描述

检测指标	极小值/ $(\mu\text{g} \cdot \text{支}^{-1})$	极大值/ $(\mu\text{g} \cdot \text{支}^{-1})$	均值/ $(\mu\text{g} \cdot \text{支}^{-1})$	标准差/ $(\mu\text{g} \cdot \text{支}^{-1})$	变异系数/ %	偏度	峰度
氢氰酸释放量	51.77	91.67	67.23	13.97	20.30	0.60	-0.69

从表 3 可知, 不同卷烟材料组配得到的卷烟样品其主流烟气中氢氰酸的释放量偏度系数略大于 0, 表现为正偏峰, 且峰度系数略小于 0, 表现为平阔峰, 整体数据稍显分散; 标准差和变异系数均较小, 偏度系数和峰度系数均接近于 0, 说明该数据统计结果基本符合正态分布特征, 可以将其作为一个整体进行分析评价.

2.2 构建逐步回归分析模型

将实验设计的各因素设为自变量, 细支卷烟样品主流烟气中氢氰酸释放量为因变量, 采用二次多项式逐步回归方法得到模型

$$Y = 96.04 - 85.81X_2 + 50.13X_2^2 - 33.89X_1X_4 + 12.98X_3X_4 \quad (1)$$

因素与主流烟气氢氰酸释放量的决定系数 $R^2 = 0.999 9$, 说明模型拟合度好; 对模型进行 F 检验, $F = 2 683.37 > F_{0.05}(4, 1) = 224.58$, 表明该回归方程达到显著水平, 具有统计学意义; 对模型进行 T 检验, $P = 0.014 < 0.05$, 表明方程中各自变量的系数均达到显著水平; 进行模型的残差独立性检验, Durbin-Watson 统计量 $d = 2.31$, 说明残差间无自相关, 表明模型具有很强的解释能力. 表 4 为目标值的标准回归系数, 反映了各因素或因素交互作用对目标值的影响程度^[23]. X_2, X_1X_4 与细支卷烟主流烟气氢氰酸释放量呈负相关, X_2^2, X_3X_4 与细支卷烟主流烟气氢氰酸释放量呈正相关.

表 4 目标值的标准回归系数

因素	标准回归系数	因素	标准回归系数
X_2	-2.077	X_1X_4	-0.590 4
X_2^2	1.277	X_3X_4	0.274 6

2.2.1 实验因子主效应分析

采用因子主效应分析法计算各因子对因变量的贡献率,该贡献率表征的是在整个实验范围内各因子的贡献大小.经计算得到各要素的贡献率分别为卷烟纸透气度 0.482 0、接装纸透气度 1.949、成型纸透气度 0.459、滤嘴丝束规格 0.941.结果表明,接装纸透气度对细支烟主流烟气氢氰酸释放量影响最大,在卷烟材料规格设计中需着重考虑;其次分别是滤嘴丝束规格、卷烟纸透气度和成型纸透气度.

2.2.2 单因素对氢氰酸释放量的影响

为深入研究其他因素在不同水平时某特定因素对细支卷烟主流烟气中氢氰酸释放量的影响规律,将模型中各因素划分为高(1.0)、中(0.5)、低(0)3个水平,并对以上实验结果进行单因素分析.设定除分析因子外的其他因子为中水平(0.5),根据回归方程(1)分别得到各因子与细支卷烟主流烟气氢氰酸释放量的关系,如图 1 所示.

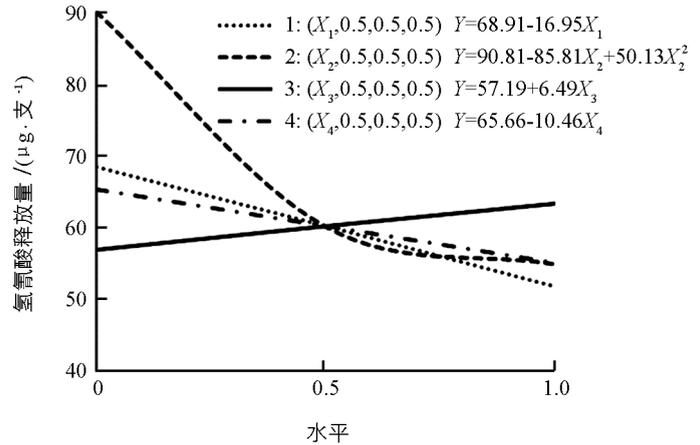


图 1 各因素对细支卷烟主流烟气中氢氰酸释放量的影响

从图 1 可以看出,在其他因素为中水平(0.5)时,不同因素对主流烟气氢氰酸释放量的影响趋势存在差异.在实验参数设定范围内,接装纸透气度 X_2 与细支卷烟主流烟气中氢氰酸的释放量呈曲线相关,通过求二次方程曲线对称轴的方法得知, $X_2=0.856$ 时出现拐点.由此可见,当 $0 \leq X_2 < 0.856$ 时,接装纸透气度(X_2)与氢氰酸释放量呈曲线负相关,当 $0.856 < X_2 \leq 1$ 时,接装纸透气度(X_2)与氢氰酸释放量呈曲线正相关;卷烟纸透气度 X_1 和滤嘴丝束 X_4 与氢氰酸释放量呈直线负相关关系;成型纸透气度 X_3 与氢氰酸释放量呈直线正相关.

2.2.3 各因子的边际主流烟气氢氰酸释放量效应

为比较各因子对细支卷烟主流烟气中氢氰酸释放量影响的速率,对回归分析模型(1)中各因子求偏导,同样将分析因子外的其他因子取中水平(0.5),得到各因子边际主流烟气氢氰酸释放量的效应关系式(表 5).由表 5 可知,在实验参数设定范围内,各因子对主流烟气氢氰酸释放量的影响速率分别为卷烟纸透气度(X_1)和滤嘴丝束规格(X_4)呈负效应,成型纸透气度(X_3)呈正效应,且不随其水平变化而变化;当 $0 \leq X_2 < 0.856$ 时,接装纸透气度(X_2)与氢氰酸释放量呈负效应,当 $0.856 < X_2 \leq 1$ 时,接装纸透气度(X_2)与氢氰酸释放量呈正效应;成型纸透气度(X_3)对氢氰酸释放量影响速率的绝对值随其水平增大先减小到 0 后再增大,说明随着接装纸透气度的水平从 0 增加到 0.856,其对氢氰酸释放量的影响速率逐渐降低,接装纸透气度的水平从 0.856 增加到 1 时,其对氢氰酸释放量的影响速率逐渐增大.

表 5 模型中各因子偏导分析结果及边际效应关系式

因子	偏导分析结果	边际效应关系式 ^①
X_1	$\partial Y/X_1 = -33.89X_4$	$\partial Y/X_1 = -16.95$
X_2	$\partial Y/X_2 = -85.81 + 100.26X_2$	$\partial Y/X_2 = -85.81 + 100.26X_2$
X_3	$\partial Y/X_3 = 12.98X_4$	$\partial Y/X_3 = 6.49$
X_4	$\partial Y/X_4 = -33.89X_1 + 12.98X_3$	$\partial Y/X_4 = -10.46$

注:① 除当前因子外,其他因子均取 0.5 水平.

2.3 综合分析、参数优化与验证

2.3.1 综合分析

通过因子主效应分析、单因素分析和边际效应分析可知, 在实验范围内卷烟纸透气度、接装纸透气度、成型纸透气度、滤嘴丝束规格对细支卷烟主流烟气氢氰酸释放量的影响显著, 且呈现不同的规律. 因此, 需要对参数组合进行寻优, 找到细支卷烟主流烟气中氢氰酸低释放量的卷烟材料参数组合.

2.3.2 参数优化与验证

使用 SPSS 统计分析软件, 基于实际参数范围内的极值寻优方法和综合平衡法, 对主流烟气氢氰酸释放量的二次模型进行求解, 得到了氢氰酸释放量较低的卷接材料组合, 即当 $X_1=1, X_2=0.75, X_3=0, X_4=1$ 时, 细支卷烟主流烟气中氢氰酸的释放量较小. 经反归一化得到的优化参数组合为卷烟纸透气度 100 CU、接装纸透气度 800 CU、成型纸透气度 6 000 CU, 滤嘴丝束规格 6.0 Y/17000.

按上述优化参数组合进行 3 次验证试验, 分别测定细支卷烟样品主流烟气氢氰酸释放量, 结果见表 6.

表 6 主流烟气氢氰酸释放量较低的卷烟材料优化参数组合验证试验

实验编号	细支卷烟样品主流烟气氢氰酸释放量			
	检测值/ $(\mu\text{g} \cdot \text{支}^{-1})$	检测平均值/ $(\mu\text{g} \cdot \text{支}^{-1})$	预测值/ $(\mu\text{g} \cdot \text{支}^{-1})$	相对偏差/%
1	30.4	30.90	25.99	8.629
2	33.6			
3	28.7			

由表 6 可以看出, 前述优化参数组合得到的细支卷烟样品主流烟气氢氰酸释放量较低, 且与模型预测值有很好的一致性, 相对偏差小于 10%.

3 结 语

1) 本文应用多种数据分析方法研究了卷烟纸透气度、接装纸透气度、成型纸透气度、滤嘴丝束规格对细支卷烟主流烟气氢氰酸释放量的影响规律. 模型的标准化回归系数从大到小依次为接装纸透气度、接装纸透气度的平方、卷烟纸透气度和滤嘴丝束规格的交互作用、成型纸透气度和滤嘴丝束规格的交互作用, 接装纸透气度、卷烟纸透气度和滤嘴丝束规格的交互作用与细支卷烟主流烟气氢氰酸释放量呈负相关, 接装纸透气度的平方、成型纸透气度和滤嘴丝束规格的交互作用与细支卷烟主流烟气氢氰酸释放量呈正相关.

2) 各因子对细支卷烟主流烟气中氢氰酸释放量的贡献度大小顺序依次为接装纸透气度、滤嘴丝束规格、卷烟纸透气度、成型纸透气度. 接装纸透气度对氢氰酸释放量影响最大, 且呈负相关, 这与卷烟材料参数影响常规卷烟主流烟气中氢氰酸释放量的研究结论一致^[24-26], 因为增加接装纸透气度可以有效稀释卷烟烟气, 进而降低主流烟气中有害成分的释放量. 当其他因子取中水平(0.5)时, 滤嘴丝束规格对氢氰酸释放量呈负相关, 随着滤嘴丝束规格增大, 丝束纵向表面积增大, 滤嘴对主流烟气中氢氰酸的过滤能力增强, 从而降低氢氰酸的释放量; 与卷烟材料参数对常规卷烟主流烟气中氢氰酸释放量影响方式不同的是, 细支卷烟成型纸透气度与氢氰酸释放量呈直线正相关关系; 通过极差反归一化换算, 接装纸透气度对细支卷烟主流烟气氢氰酸释放量的影响在 884.8 CU 处出现拐点, 先呈负相关, 再呈正相关, 影响速率绝对值随其水平增大在同样的拐点先减小到 0 再增加. 因此, 结合卷烟设计和生产实际情况, 适当增加卷烟纸的透气度, 选择接装纸透气度在 884.8 CU 附近, 较大的滤嘴丝束规格, 可在一定程度上降低细支卷烟主流烟气

中氢氰酸的释放量。

3) 通过综合分析,得到了细支卷烟主流烟气中氢氰酸释放量较低时的卷烟材料参数优化组合,并使用优化后的材料组合进行样品卷制验证。

4) 以上研究结论是针对同一叶组配方以及采用相同生产工艺流程制得的细支卷烟样品得出的,是否适用于实验范围以外的情况还需进一步验证。

参考文献:

- [1] 李 钊. 提高细支烟在 PSSIM 机型改造后的可靠性 [J]. 机械工程师, 2014(9): 222-223.
- [2] 殷树强. PASSIM8K 机组生产超细支($\phi 5.4$)卷烟 [J]. 科技与企业, 2013(18): 304.
- [3] 刘小苏, 文胜辉, 冯雄裕, 等. 一种新型 GDX2 细支烟异型包装机六号轮模盒: 中国, CN204871700U [P]. 2015-12-16.
- [4] 韦干付, 朱润铭, 周肇峰, 等. 一种适用超细支烟的劈刀盘: 中国, CN204861136U [P]. 2015-12-16.
- [5] 张爱武, 王安宽, 谢崇权, 等. 用于超细支烟的搓板机构: 中国, CN205567802U [P]. 2016-09-14.
- [6] SCHNEIDER W, SCHLÜTER A. A Semi-Empirical for Simulating the Effect of Design Components on Smoke Deliveries[R/OL]. 1987 [2016-11-24]. Southampton: British American Tobacco. <https://industrydocuments.library.ucsf.edu/tobacco/docs/#id=msfl0138>.
- [7] 章平泉, 徐光忠, 陆 斌, 等. 细支卷烟主要物理特性的因子分析 [J]. 安徽农学通报, 2017, 23(4): 76-77.
- [8] 田 忠, 陈 闯, 许宗保, 等. 制丝关键工序对细支卷烟燃烧温度及主流烟气成分的影响 [J]. 中国烟草学报, 2015, 21(6): 19-26.
- [9] 廖晓祥, 赵云川, 邹 泉, 等. 梗丝形态对细支卷烟品质稳定性的影响 [J]. 烟草科技, 2016, 49(10): 74-80.
- [10] 孙东亮, 赵华民. 基于消费者感知的细支卷烟轻松感、满足感设计思路 [J]. 中国烟草学报, 2017, 23(2): 42-49.
- [11] 谢剑平, 刘惠民, 朱貌祥, 等. 卷烟烟气危害性指数研究 [J]. 烟草科技, 2009(2): 5-15.
- [12] 汪长国, 周学政, 杨文敏, 等. 一种评价丝束纵向表面积的方法及其应用: 中国, 102692205A [P]. 2012-09-26.
- [13] 国家烟草专卖局. YC/T 253-2008 卷烟主流烟气中氢化氰的测定——连续流动法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [14] 谭兰兰, 汪长国, 冯广林, 等. 不同材料组合对卷烟主流烟气中苯并 [a] 芘释放量的影响 [J]. 烟草科技, 2015(3): 33-38.
- [15] 方开泰, 刘民千, 周永道. 试验设计与建模 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [16] 曹慧荣, 李 莉. 均匀设计表的 MATLAB 实现 [J]. 统计与决策, 2008(6): 144-146.
- [17] 谭兰兰, 汪长国, 冯广林, 等. 不同材料组合对卷烟主流烟气中苯并 [a] 芘释放量的影响 [J]. 烟草科技, 2015, 48(3): 33-38.
- [18] 包和平, 刘士彪, 王晓波, 等. N、P、K 三要素对水稻产量的效应分析 [J]. 吉林农业大学学报, 2001, 23(2): 5-8.
- [19] 周学政, 汪长国, 戴 亚, 等. 综合平衡法在滚筒管板烘丝机工艺参数优化中的作用 [J]. 烟草科技, 2009(4): 18-24.
- [20] 杨 铎. 基于 Gauss-Newton 法的空间管形拟合算法的研究 [J]. 大连大学学报, 2014, 35(3): 19-23.
- [21] 韩 敏, 王亚楠. 求解非线性回归问题的 Newton 算法 [J]. 计算机学报, 2010, 33(5): 841-846.
- [22] 刘慧敏, 王宏强, 黎 湘. 基于 RPROP 算法目标识别的数据归一化研究 [J]. 现代雷达, 2009, 31(5): 55-60.
- [23] 张 浩, 刘秀玉, 宗志芳. 基于均匀设计和多元非线性回归法优化制备改性钠基蒙脱土 [J]. 过程工程学报, 2017, 17(1): 188-192.
- [24] 杨红燕, 杨 柳, 朱文辉, 等. 卷烟材料组合对主流烟气中 7 种有害成分释放量的影响 [J]. 中国烟草学报, 2011, 17(2): 8-13.

- [25] 赵 乐, 彭 斌, 于川芳, 等. 辅助材料设计参数对卷烟 7 种烟气有害成分释放量的影响 [J]. 烟草科技, 2012(10): 46-50.
- [26] 罗彦波, 庞永强, 姜兴益, 等. PLS 回归法分析多因素对卷烟燃烧温度及主流烟气有害成分释放量的影响 [J]. 烟草科技, 2014(10): 56-60.

Influence of Cigarette Material Parameters on Hydrocyanic Acid Delivery in Mainstream Smoke of Slim Cigarette

WU Jin-feng¹, DAI Ya¹, ZHUANG Ya-dong², CHEN Kun-yan¹,
SHANG Jun¹, LAN Zhong-yu¹, WANG Chang-guo¹

1. Technical Research Center, China Tobacco Chongqing Industrial Co., Ltd., Chongqing 400060, China;

2. Technical Research Center, China Tobacco Jiangsu Industrial Co., Ltd., Nanjing 210019, China

Abstract: In order to study the influences of cigarette material parameters, i. e. cigarette paper permeability (X_1), tipping paper permeability (X_2), plug wrapper permeability (X_3) and tow specification in the filter (X_4) on hydrocyanic acid (HCN) delivery in the mainstream smoke of slim cigarette, a uniform design experiment was made, in which test cigarette samples were prepared with different cigarette material combinations. A mathematical model for hydrocyanic acid delivery in mainstream smoke of slim cigarette was constructed with the quadratic polynomial stepwise regression method. Factorial principal effect, single factor effect and marginal effect analyses were made of the mathematical model. The results showed that of the 4 cigarette material parameters studied, X_2 had the greatest influence on HCN yield, followed in sequence by X_4 , X_1 and X_3 ; that the delivery of HCN was in a negative correlation with X_2 and the interaction between X_2 and X_1 , and between X_2 and X_4 , and in a positive correlation with $(X_2)^2$ and the interaction between $(X_2)^2$ and X_3 , and between $(X_2)^2$ and X_4 ; that the optimized material combination for low HCN delivery was: $X_1=100$ CU, $X_2=800$ CU, $X_3=6\ 000$ CU, $X_4=6.0$ Y/17000; and that compared with the sample which delivered the lowest HCN in the experimental group, the HCN delivery in mainstream smoke of slim cigarette prepared with the optimized material combination was decreased by 40.31%.

Key words: slim cigarette; uniform design experiment; hydrocyanic acid; cigarette material combination