

多元非线性回归法探讨细支烟材料参数 对焦油释放量的影响^①

陈昆燕¹, 戴亚¹, 周学政¹, 寇明钰¹,
陈磊², 齐延鹏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. 重庆宏声实业(集团)有限责任公司, 重庆 400060

摘要: 为研究细支烟主流烟气焦油释放量受材料参数(卷烟纸透气度、接装纸透气度、成型纸透气度、滤棒丝束规格)的影响程度, 运用均匀设计实验方案制备了不同材料组合的卷烟样品, 采用多元非线性回归法, 通过单因素、主效应、边际效应等分析方法对建立的焦油释放量(因变量)与材料参数(自变量)数学模型进行了数据分析, 进一步优化参数与验证实验。结果表明: 卷烟纸透气度对细支烟主流烟气焦油释放量影响无统计学意义, 其余因子对细支烟主流烟气焦油释放量影响由大到小依次为接装纸透气度、成型纸透气度、滤棒丝束纵向表面积等效描述指数(以下简称滤棒丝束指数); 细支卷烟主流烟气焦油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, 滤棒丝束规格为 8.0Y/15 000。

关键词: 细支烟; 材料参数; 焦油; 均匀设计; 多元非线性回归

中图分类号: S572

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2022)02-0050-06

Influence of Cigarette Material Parameters on Tar Deliver in Mainstream Smoke of Slime Cigarette Based on Multivariate Nonlinear Regression Method

CHEN Kunyan¹, DAI Ya¹, ZHOU Xuezheng¹,
KOU Mingyu¹, CHEN Lei², QI Yanpeng¹,
SHANG Jun¹, LAN Zhongyu¹, WANG Changguo¹

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

2. Chongqing Hongsheng Industry (Group) Co., Ltd., Chongqing 400060, China

Abstract: In slimmer cigarette, in order to investigate the influence of patterns of cigarettes material

① 收稿日期: 2020-03-19

基金项目: 重庆中烟工业有限责任公司科技项目(2018hx020)。

作者简介: 陈昆燕, 硕士, 高级工程师, 主要从事卷烟工艺及卷烟材料的研究。

通信作者: 汪长国, 硕士, 研究员。

parameters on tar deliver in the mainstream smoke including cigarette paper air permeability, tipping paper air permeability, plug wrapper air permeability and the tow specification in the filter were investigated by uniform design, the test cigarettes with various material paremeters were prepared. And the main effect, single factor effect, actual effect analysis, parameter optimization and experimental verification of the model were applied. The results show that: the air permeability of cigarette paper had no significant effect on the tar deliver in mainstream smoke of slim cigarettes; the other factors affected the tar deliver in the mainstream smoke of slim cigarettes as follows: the air permeability of tipping paper>the air permeability of plug wrapper paper>the tow specification in the filter; the optimized material combination for low tar deliver were: cigarette paper air permeability 100 CU, the air permeability of plug wrapper paper 800 CU, the air permeability of plug wrapper paper 6 000 CU, tow specifications in the filter 8.0Y/15 000.

Key words: slim cigarette; cigarette material parameters; tar; uniform design; multivariate nonlinear regression method

卷烟材料,三纸一棒(主要指丝束)的合理组配不仅可以实现卷烟产品的特定风格,而且被证实对卷烟烟气指标、物理指标等均有较大影响,尤其对焦油这一重要指标的释放量影响较大,一直都是“降焦减害”的热点研究领域^[1-3].然而,近年来逐步成为国内外新消费热点的细支卷烟,对其焦油释放量的相关研究却甚少,主要集中在设备改造、梗丝形态对其品质稳定性的影响、不同抽吸模式间烟气指标的差异等方面^[4-5].较常规卷烟,细支卷烟具有圆周较小、烟支长等外观显著特点,烟支燃烧时烟气分布状态必然会有较大差异^[6].针对细支卷烟燃烧时区别于常规卷烟的烟气分布差异,选定叶组品牌,基于均匀设计的实验基础,采用多元非线性回归法探讨细支卷烟材料参数对焦油释放量的影响,建立相关预测模型,旨在为细支卷烟设计时材料的选择提供帮助,达到科学合理地控制细支卷烟焦油释放量的目的.

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料

卷烟纸、接装纸、成型纸 5 种(透气度不同)、3 种不同规格的滤棒丝束(为了方便单一指标进行量化,本文在数据处理中采用文献[7]的方法对滤棒丝束特性进行替代).

某卷烟牌号叶组配方烟丝,重庆中烟涪陵分厂提供.

1.1.2 仪器

吸烟机(RM200A),BORGWALDT;气相色谱(7890GC/5975MSD),Agilent;电子天平(BAS224S-CW),Sartorius;恒温恒湿箱(KBF720),Binder.

1.2 方法

1.2.1 样品卷制

按实验设计表 1 进行实验,其余参数保持一致.圆周设定值为 17.2 mm,烟支其余物理指标在规定允许的误差范围内使用.上机测试抽吸前,样品平衡条件:温度(22±1)℃,相对湿度(60±3)%.样品调节时间为 48 h 以上,按照(540±5) mg 分选样品.

1.2.2 焦油的检测

卷烟抽吸及焦油检测依据相应的国家标准进行^[8-11].

1.2.3 实验设计

以选定的细支卷烟各卷接材料为因素,以“均匀设计的计算机辅助设计”进行实验方案^[12-13]设计,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
滤棒丝束指数(x_4)	5 303.3	5 842.37	6 940.22		

1.2.4 数据处理

采用 DPS 17.10,SPSS 18.0 软件,以各材料因子为自变量,主流烟气中焦油释放量为因变量,利用多因子及平方项逐步回归方法建立数学模型进行检验;采用文献[14]的方法计算得到各因子的贡献率;结合实际生产中使用的材料参数,采用极值寻优和综合平衡法^[15-18],得到主流烟气焦油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

依据表 1 进行了 6 组、每组 3 次重复的参数组合实验,结果见表 2,由于各因素的数量级和量纲不同,采用极差归一化^[19-20]对各因素进行变换.

表 2 样品焦油释放量

样品	卷烟纸(x_1)	接装纸(x_2)	成型纸(x_3)	滤棒丝束指数(x_4)	焦油/(mg·支 ⁻¹)
XZB-1	0.200 0	0.250 0	1.000 0	0.000 0	8.15
XZB-2	1.000 0	0.750 0	0.500 0	0.000 0	6.41
XZB-3	0.400 0	0.000 0	0.000 0	0.329 3	9.41
XZB-4	0.000 0	1.000 0	0.200 0	0.329 3	7.22
XZB-5	0.400 0	0.500 0	0.700 0	1.000 0	6.78
XZB-6	0.600 0	0.500 0	0.500 0	1.000 0	6.58

依据表 2 的检测结果,其描述统计结果见表 3.

表 3 实验样品主流烟气焦油释放量的描述统计

指标	最大值 /(mg·支 ⁻¹)	最小值 /(mg·支 ⁻¹)	平均值 /(mg·支 ⁻¹)	标准差 /(mg·支 ⁻¹)	变异系数 /%	偏度	峰度
焦油释放量	9.41	6.41	7.43	1.15	15.55	1.22	0.66

从表 3 可知,各组合得到的细支卷烟样品焦油释放量偏度系数大于 0,为正偏峰;峰度系数大于 0,为尖峭峰,数据集中在均值附近;变异系数和标准差均较小,表明其统计结果基本符合正态分布的特征,可将其作为一个整体来进行分析和评价.

2.2 逐步回归分析模型

以表 2 中规格化后的参数为自变量,焦油释放量为因变量,采用二次多项式逐步回归方法建立模型:

$$y=9.372-10.24\ x_2+0.114\ 7\ x_4+8.020\ x_2^2+0.837\ 2\ x_3^2$$

因素与焦油释放量的 $R^2=0.999\ 9$,模型拟合度良好; $F=3\ 463\ 790.5>F_{0.01}(4,1)=5\ 624.6$, F 检验结果表明该回归方程达到极显著水平,差异有统计学意义; $p=0.000\ 4<0.01$, T 检验表明方程中各自变量的系数差异有统计学意义;模型的残差独立性检验,Durbin-Watson 统计量为 2.61,残差无自相关,模型具有很强的解释能力.

2.3 因子主效应分析结果^[15]

计算得到各要素的贡献率:接装纸透气度为 1.999、成型纸透气度为 0.998、滤棒丝束指数为 0.992. 数

据分析表明,在实验范围内,卷烟纸透气度对细支烟主流烟气中焦油释放量影响无统计学意义,其余各因素对焦油释放量的影响程度由大到小依次为接装纸透气度、成型纸透气度、滤棒丝束指数.

2.4 单因素效应分析结果

为进一步研究各单因素对主流烟气焦油释放量的影响,将其余因素分别置于高(1.0)、中(0.5)、低(0)水平时,对回归数学模型进行各因素与主流烟气焦油释放量的关系研究.以其他因子中水平为例,得到各因子与目标释放量的关系,见图 1.

由图 1 可知,在实验范围内,其他因素取中水平时,各因子对细支卷烟主流烟气焦油释放量的影响差异较大.接装纸透气度在 $0 \leq x_2 \leq 0.638$ 之间取值时,接装纸透气度与焦油释放量呈负相关;当 $0.638 < x_2 \leq 1$ 时,接装纸透气度与焦油释放量呈正相关; $x_2 = 0.638$ 时,焦油释放量最小. x_3 与焦油释放量呈曲线正相关, $x_3 = 0$ 时为最小值.滤棒丝束指数(x_4)在实验范围内与焦油释放量呈线性正相关,在 $x_4 = 0$ 时,焦油释放量为最小值.

2.5 边际效应分析结果

为比较各自变量对目标释放量影响的速率,对模型各因子求偏导,以其他因子中水平(0.5)为例,求得各因子与焦油的边际效应关系式,结果见表 4.

表 4 各因子偏导分析结果

因子	偏导方程
x_2	$\frac{\partial y}{\partial x_2} = 10.24 + 16.04 x_2$
x_3	$\frac{\partial y}{\partial x_3} = 1.674 4 x_3$
x_4	$\frac{\partial y}{\partial x_4} = 0.114 7$

由表 4 可知,当其他因子取值 0.5 水平时,在实验范围内, x_2, x_3 的边际释放效应关系是两组斜率为正值的斜线,呈正效应, x_2 和 x_3 对细支烟焦油释放量的影响速率均随自身水平的增加而逐渐变大; x_4 对焦油释放量的影响速率为正效应,且为常数,不随其他因子水平的变化而变化.

在实验范围内, x_2 的边际焦油效应直线斜率大于 x_3 ,说明 x_2 变化对焦油释放量的影响较 x_3 大,与因子主效应分析结果一致.

2.6 优化与验证结果

2.6.1 参数优化验证

根据生产实际和已建立的数学模型,在各因素的变化范围内,运用综合平衡法并结合公司常用辅材规格,寻求得到了在实验范围内主流烟气焦油释放量的低值因子组合,即当 $x_1 = 1, x_2 = 0.638, x_3 = 0, x_4 = 0$ 时,目标值焦油释放量较小.经反归一化可得参数优化组合: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、滤棒丝束规格为 8.0 Y/15 000.

按上述所得参数优化组合进行 3 次验证实验,分别测定样品的焦油释放量,结果见表 5.

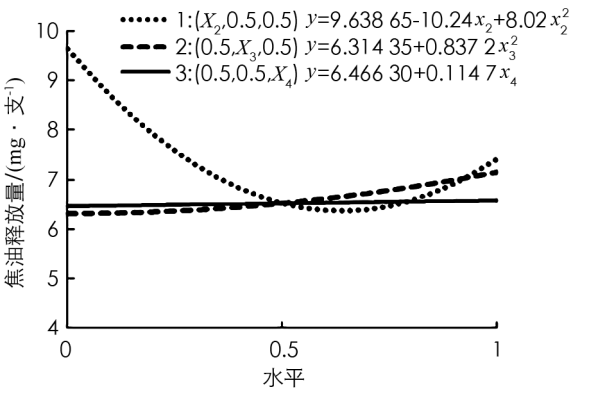


图 1 各因素与主流烟气焦油释放量关系图
(其他因素为中水平)

表 5 主流烟气焦油释放量较低的卷烟材料优化参数组合验证实验

试验编号	样品主流烟气焦油释放量			
	检测值/(mg·支 ⁻¹)	平均值/(mg·支 ⁻¹)	预测值/(mg·支 ⁻¹)	相对偏差/%
1	5.81	5.90	6.10	3.39
2	6.03			
3	5.76			

由表 5 可知，寻优参数组合的样品焦油释放量较低，与预测值有较好的一致性，相对偏差小。

2.6.2 卷烟纸透气度影响验证

前述实验结果数据分析表明，卷烟纸对细支烟主流烟气中焦油释放量影响无统计学意义。根据因子主效应分析结果和数学模型的寻优结果，采用其他条件固定不同透气度卷烟纸，进一步验证卷烟纸透气度对细支烟焦油释放量的影响。

结合生产实际，分别选用 50,60,70,80,100 CU 这 5 种不同透气度的卷烟纸(除透气度外，其余条件相同)，搭配其余材料， x_2 选用 800 CU， x_3 选用 6 000 CU， x_4 选用 8.0 Y/15 000，按照上述参数组合随机进行了 5 组验证实验，每组实验 3 次重复，分别测定卷烟样品主流烟气的焦油释放量，结果见表 6。

表 6 不同透气度卷烟纸主流烟气焦油释放量测定值

样品编号	检测值/(mg·支 ⁻¹)
xzyz-50	6.20
xzyz-60	6.10
xzyc-70	6.10
xzyz-80	5.90
xzyz-100	5.90

注：样品编号后缀数字分别代表卷烟纸的透气度。

由表 6 可以看出，不同卷烟纸透气度细支卷烟样品主流烟气焦油释放量差异较小，几组实验样品的最大相对偏差仅为 5.08%，说明在实验范围内，不同透气度卷烟纸对细支烟主流烟气焦油释放量的影响极小，其验证结果与因子主效应卷烟纸透气度影响无统计学意义的分析结果相吻合。

与传统卷烟相比，当卷烟纸透气度从 50 CU 增加到 100 CU 时，细支烟焦油释放量差异无统计学意义，这与常规卷烟的焦油释放量随卷烟纸透气度增加而减小的规律差异较大。究其原因，可能是细支烟直径变小，燃烧锥明显变细增长，卷烟纸透气度对烟支的燃烧状态的影响相对较小。

3 结论与讨论

- 1) 本文应用了主效应分析、单因素分析、边际效应分析等多种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、滤棒丝束指数这几种卷烟基本材料对细支烟主流烟气焦油释放量的影响规律。除卷烟纸透气度外，其余各因子对细支烟主流烟气焦油释放量影响由大到小依次为接装纸透气度、成型纸透气度、滤棒丝束指数。
- 2) 在实验范围内，卷烟纸透气度对细支烟主流烟气焦油释放量影响无统计学意义，这与常规卷烟纸透气度对其主流烟气焦油释放量影响较大的结论不同，可能是由于细支卷烟直径较小、燃烧锥细长、卷烟纸透气度对烟支抽吸时不充分燃烧的影响相对较小所致。
- 3) 得到并验证了主流烟气焦油释放量较低时的优化参数组合，结果表明对于实验所用烟丝，在卷烟纸透气度为 100 CU、接装纸透气度为 800 CU、成型纸透气度为 6 000 CU、滤棒丝束规格为 8.0 Y/15 000 时，卷烟主流烟气焦油释放量可以达到相对较低值，为 5.90 mg/支。
- 上述研究结论是针对同一叶组配方及生产工艺流程得出的，是否适用实验范围以外的情况还需进一步验证。

参考文献:

- [1] 谢卫,黄朝章,苏明亮,等.辅助材料设计参数对卷烟7种烟气有害成分释放量及其危害性指数的影响[J].烟草科技,2013,46(1):31-38.
- [2] 李海锋,杨皓,宣润泉,等.卷烟纸特性对细支烟主流烟气指标的影响[J].中国造纸,2017,36(6):38-42.
- [3] 金勇,王诗太,李克,等.接装纸打孔参数对卷烟烟气焦油及7种有害成分释放量影响的PLS回归分析[J].烟草科技,2016,49(4):37-44.
- [4] 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.
- [5] 甘学文,胡启秀,蒋锦锋,等.HCI模式对超细卷烟常规烟气成分测试结果的影响[J].烟草科技,2014,47(7):40-44.
- [6] 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.
- [7] 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:CN102692205A[P].2012-09-26.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.常规分析用吸烟机定义和标准条件:GB/T 16540-2004[S].北京:中国标准出版社,2005.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.卷烟用常规分析用吸烟机测定总粒相物和焦油:GB/T 19609-2004[S].北京:中国标准出版社,2005.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.卷烟总粒相物中水分的测定第1部分:气相色谱法:GB/T 23203.1-2008[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.卷烟总粒相物中烟碱的测定气相色谱法:GB/T 23355-2009[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [12] 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.
- [13] 曹慧荣,李莉.均匀设计表的MATLAB实现[J].统计与决策,2008(6):144-146.
- [14] 杜红毅,戴亚,汪长国,等.卷烟材料参数对主流烟气焦油释放量的影响[J].西南师范大学学报(自然科学版),2017,42(12):58-67.
- [15] 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.
- [16] 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应用[J].烟草科技,2009,42(4):18-20,24.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 侯丽云,张旭,吴珍.多种归一化方法对miRNA微阵列数据的作用分析及比较[J].西南师范大学学报(自然科学版),2020,45(5):98-102.

责任编辑 周仁惠