

基于层次分析和响应面设计的烟丝膨胀工艺优化

Research on optimization of expanded cut tobacco based on analytic hierarchy process and response surface methodology

丁乃红¹

寇霄腾¹

张 卉¹

赵春雷¹

DING Nai-hong¹ KOU Xiao-teng¹ ZHANG Hui¹ ZHAO Chun-lei¹

何金华² 雷 振² 徐迎波²

HE Jin-hua² LEI Zhen² XU Yin-bo²

(1. 安徽中烟工业有限责任公司蚌埠卷烟厂, 安徽 蚌埠 233010;

2. 安徽中烟工业有限责任公司技术中心, 安徽 合肥 230088)

(1. Bengbu Cigarette Factory, China Tobacco Anhui Industrial Co., Ltd., Bengbu, Anhui 233010, China;

2. Technology Center of China Tobacco Anhui Industrial Co., Ltd., Hefei, Anhui 233088, China)

摘要: 选用干冰法膨胀烟丝, 采用层次分析法确定膨胀烟丝各项质量指标权重, 对数据规范化处理后进行综合评价得到综合质量得分。选取浸渍时间、工艺气温度、热风风速、蒸汽施加量为主要考察因素, 研究其对综合质量得分的影响, 并使用响应面法优化膨胀烟丝加工工艺条件。结果表明, 优化后的烟丝膨胀工艺条件为浸渍时间 42 s、工艺气温度 291 °C、热风风速 38 m/s、蒸汽施加量 500 kg/h, 该条件下膨胀烟丝的综合质量得分为 1.052。

关键词: 烟丝; 干冰法; 膨胀; 层次分析; 响应面设计

Abstract: The weight of each quality index of the expanded tobacco was determined by the analytic hierarchy process, and the comprehensive quality score was obtained by the comprehensive evaluation after the data standardization. On the basis of single factor test, the main factors, such as cold end immersion time, hot end process gas temperature, hot air speed and steam application amount, were selected to study their influence on the comprehensive quality score. Finally, the response surface method was used to optimize the processing conditions of expanded tobacco. After optimization, the process conditions are as follows: Soaking time 42 s, process gas temperature 291 °C, wind speed 38 m/s, steam application 500 kg/h, and the comprehensive quality score is 1.052.

Keywords: cut tobacco; dry ice method; expansion; analytic hierarchy process; response surface design

基金项目: 安徽中烟工业有限责任公司科技项目(编号: 2017103)

作者简介: 丁乃红, 男, 安徽中烟工业有限责任公司高级工程师, 硕士。

通信作者: 赵春雷(1976—), 男, 安徽中烟工业有限责任公司高级工程师, 硕士。E-mail: kxt1987@sina.cn

收稿日期: 2019-11-03

archy process; response surface design

膨胀烟丝在卷烟中能起到减害降焦、提升烟丝填充性能和卷烟烟气透发性等功能, 因此在卷烟配方中至关重要。学者们对膨胀烟丝加工工艺进行了大量研究, 赵玉洁等^[1]对 CO₂ 烟丝膨胀线工艺参数与膨胀烟丝化学成分关系进行了探讨, 发现在蒸汽施加量一定时, 工艺气体温度较高, 膨胀烟丝烟气中焦油、烟碱量较低。牛勇等^[2]对 CO₂ 膨胀处理对烟丝部分香味成分的影响进行了研究, 确定了有利于 CO₂ 膨胀烟丝感官质量的适宜加工条件。张建勋等^[3]对改善 CO₂ 膨胀烟丝结构做了探讨, 研究了膨胀温度、气体流量等工艺参数对填充值、整丝率的影响, 并对工艺参数进行了优化, 结果表明: 当工艺气体温度为 355 °C, 饱和蒸汽流量为 600 kg/h 时, 膨胀烟丝结构最佳; 膨胀前烟丝水分以 22% 为宜; 在膨胀烟丝中施加保润剂, 能明显增强烟丝的抗碎性。徐俊等^[4]研究了 CO₂ 膨胀处理对烟丝物理结构的影响, 结果表明, 烟丝膨胀后, 整丝率显著性下降, 填充值显著性上升, 碎丝率变化不显著。不同等次和部位的烟丝膨胀前后结构指标变化存在一定差异, 下等烟、下部烟和上部烟的整丝率显著下降, 碎丝率增加较多, 而中部烟和中上等烟整丝率保持较好, 碎丝增加较少。熊安言等^[5]研究了 CO₂ 叶丝膨胀线工艺参数对烟气成分的影响。康金岭等^[6]以膨胀烟丝的整丝率为参考指标, 在单因素试验基础上, 通过 DOE 试验设计, 运用曲面响应法研究干冰膨胀工艺参数对膨胀烟丝整丝率的影响, 结果表明, 膨胀烟丝整丝率最佳工艺参数为浸渍含水率 20.0%, 工艺气体温度 300 °C, 工艺

气体流速 32 m/s。目前对膨胀烟丝工艺参数优化研究仅局限在对烟丝物理、化学和感官质量的单指标分析优化,而忽略了加工参数对各项质量指标的综合影响。层次分析法^[7]可以将研究对象作为一个系统,按各评价指标对研究对象影响的程度进行权重确定,最后进行综合评价。

试验拟采用层次分析法对各项质量指标进行综合评价,确定加工后膨胀烟丝各质量指标权重,对数据进行规范化处理后得到综合质量得分。以综合质量得分为因变量,采用响应面设计法^[8-10]对膨胀烟丝加工工艺条件进行优化,为保障膨胀烟丝的顺利转线提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料

某一配方的膨胀烟丝原料:安徽中烟工业有限责任公司蚌埠卷烟厂。

1.2 仪器设备

CO₂叶丝膨胀线:570 kg/h 型,北京达特烟草成套设备技术开发有限责任公司;

恒温恒湿箱:BF540 型,德国 Binder 公司;

烟丝填充值测定仪:YDZ430 型,中国烟草总公司郑州烟草研究院;

叶丝振动分选筛:YQ-2 型,中国烟草总公司郑州烟草研究院;

电子天平:ABS204-S 型,感量 0.000 1 g,瑞士 Mettler Toledo 公司。

1.3 方法

1.3.1 CO₂膨胀烟丝工艺流程

备丝→计量→叶丝浸渍→松散膨胀→冷却回潮→叶丝风选→贮存

1.3.2 层次分析法确定各因变量权重 采用层次分析法确定各因变量权重,旨在将多个因变量合成为一个变量,便于最优参数的确定,研究因变量为烟丝综合质量得分(整丝率、填充值和感官质量),整丝率测定按 YC/T 178—2003 执行,填充值测定按 YC/T 152—2001 执行,感官质量评价按 YC/T 415—2011 执行。

1.3.3 各质量指标数据标准化处理 由于要分析的系统内因变量物理意义不同,故其量纲不一定相同,为了便于分析,需对数据进行标准化处理。采用均值化方法^[11]对试验结果数据进行标准化处理,方法如下:

记产品质量指标设计值和各个样本的感官质量得分 $x_i^0(1)$ 、整丝率 $x_i^0(2)$ 和填充值 $x_i^0(3)$ 等指标的数据组成的原始矩阵为:

$$\mathbf{x}_i^0 = \{x_i^0(1), x_i^0(2), x_i^0(3)\}, i = 0, 1, 2, 3, \dots, (1)$$

式中:

$x_i^0(1)$ ——感官质量得分;

$x_i^0(2)$ ——整丝率, %;

$x_i^0(3)$ ——填充值, cm³/g。

对原始矩阵均值化处理后,得到矩阵为

$$\mathbf{x}_i = \{x_i(1), x_i(2), x_i(3)\}, i = 0, 1, 2, 3, \dots, (2)$$

$$x_i(k) = \frac{x_i^0(k)}{\frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n x_i^0(k)}, k = 1, 2, 3, (3)$$

式中:

$x_i(1)$ ——感官质量得分均值化;

$x_i(2)$ ——整丝率均值化;

$x_i(3)$ ——填充值均值化;

$x_i^0(k)$ ——每次试验各质量指标的结果。

综合质量得分为

$$Y = \sum_{i=1}^n x_i(k) W_i (4)$$

式中:

x_i ——各指标的标准化数值;

W_i ——权重, %;

k ——质量指标。

1.3.4 单因素试验 以加工后膨胀烟丝综合质量得分为考核指标,采用 1.3.2 的评价方法,选取浸渍时间(20, 30, 40, 50, 60 s),工艺气温度(250, 270, 290, 310, 330 ℃),热风风速(34, 36, 38, 40, 42 m/s),蒸汽施加量(400, 450, 500, 550, 600 kg/h)4 个因素进行单因素试验,每组试验重复 3 次,确定每个因素对膨胀烟丝综合质量得分(Y)的影响范围。在进行单因素试验时,其他非因素指标均按照各个因素水平中间值进行加工试验。

1.3.5 响应面法试验设计 根据单因素试验的结果,确定出膨胀烟丝综合质量得分影响因素和各因素的水平范围,从而得出响应面法的试验方案。

1.3.6 数据分析 采用 Design-Expert 8.0.6 和 Excel 2013 等软件进行处理。

2 结果与分析

2.1 因变量指标权重

(1) 判断矩阵的构建:选取由从事质量管理、工艺研究和产品研发的 10 位专家,根据卷烟国标、工作经验、消费者调查等,共同讨论构造出判断矩阵,见表 1,通过计算各指标权重得出:W(0.10, 0.17, 0.73),即整丝率 0.1,填充值 0.17,感官质量 0.73。

表 1 判断矩阵 $U-U_j$

Table 1 Jugement matrix $U-U_j$

综合质量 U	整丝率 U_1	填充值 U_2	感官质量 U_3
整丝率 U_1	1	1/2	1/6
填充值 U_2	2	1	1/5
感官质量 U_3	6	5	1

(2) 判断矩阵一致性检验:

$$CR = \frac{(\lambda_{\max} - n)/(n - 1)}{RI} \quad (5)$$

式中:

CR ——判断矩阵 $U-U_j$ 的一致性比率;

n ——矩阵阶数;

$\lambda_{\max}$ ——最大特征根;

RI ——平均随机一致性指标。

通过计算 $CR = 0.03 < 0.1$, 因此判断矩阵满足一致性。

2.2 膨胀烟丝加工单因素试验

由图 1 可知, 膨胀烟丝加工综合质量得分, 随着浸渍时间的延长呈现明显上升趋势, 当浸渍时间为 40 s 时综

合质量得分达到最大(为 1.051), 当浸渍时间进一步延长后, 呈现出趋近平衡的趋势, 综合考虑生产效率, 适宜浸渍时间为 40 s; 工艺气温度主要影响烟草细胞膨胀以及感官质量, 随着工艺气温度的升高呈现先上升后下降的趋势, 当工艺气温度为 290 ℃ 时综合质量得分达到最大(为 1.052), 综合考虑适宜工艺气温度为 290 ℃; 随着热风风速的增大呈现先上升后下降的趋势, 当热风风速为 38 m/s 时综合质量得分达到最大(为 1.048), 确定 38 m/s 为适宜热风风速; 蒸汽施加量主要影响工艺气热焓值, 进一步影响烟丝脱水效率和感官质量, 随着蒸汽施加量的增大呈现先下降后上升再下降的趋势, 当蒸汽施加量为 500 kg/h 时综合质量得分达到最大(为 1.049), 因此确定适宜蒸汽施加量为 500 kg/h。

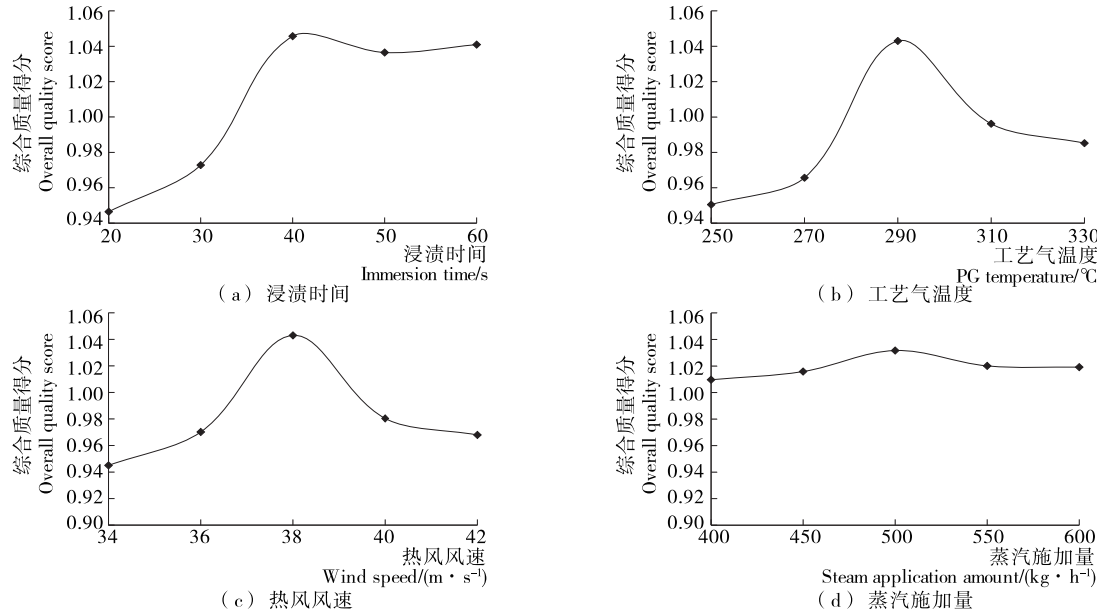


图 1 单因素试验对综合质量的影响

Figure 1 Influence of single factor test on comprehensive quality

2.3 响应面优化试验

2.3.1 响应面试验结果及模型分析 以单因素试验结果为基础, 采用 Box-Behnken 试验设计, 利用 Box-Behnken 中心设计原理, 选择浸渍时间、工艺气温度、热风风速、蒸汽施加量 4 个因素作为主要考察因素, 每个因素选取 3 个水平, 以成品膨胀烟丝综合质量得分为考察指标, 运用 Design-Expert 软件设计一个四因素三水平中心组合设计, 因素及水平见表 2, 试验结果见表 3, 方差分析见表 4。

通过 Design-Expert 软件对试验数据进行分析拟合, 得到浸渍时间、工艺气温度、热风风速和蒸汽施加量对膨胀烟丝综合质量指标的回归方程为:

$$Y = -23.757\ 25 + 0.024\ 473A + 0.104\ 85B + 0.395\ 63C + 6.089\ 17E - 003D + 1.250\ 00E - 006AB +$$

$$8.750\ 00E - 005AC - 2.053\ 91E - 018AD + 1.687\ 50E - 004BC + 1.250\ 00E - 006BD - 2.500\ 00E - 005CD - 3.386\ 67E - 004A^2 - 1.924\ 79E - 004B^2 - 5.716\ 67E - 003C^2 - 5.496\ 67E - 006D^2. \quad (6)$$

表 2 响应面设计因素和水平编码值

Table 2 Response surface design factor and horizontal coded value

水平	A 浸渍时间/s	B 工艺气温度/℃	C 热风风速/(m·s ⁻¹)	D 蒸汽施加量/(kg·h ⁻¹)
-1	30	270	36	450
0	40	290	38	500
1	50	310	40	550

表 3 Box-Behnken 试验设计与结果
Table 3 Box-Behnken test design and results

试验编号	A	B	C	D	综合质量	试验编号	A	B	C	D	综合质量
1	1	-1	0	0	0.941	16	0	1	-1	0	0.951
2	0	1	0	1	0.969	17	-1	0	0	-1	0.991
3	0	-1	0	1	0.951	18	0	0	-1	-1	1.012
4	1	0	0	1	1.019	19	1	0	1	0	1.008
5	1	1	0	0	0.949	20	0	0	0	0	1.054
6	0	1	0	-1	0.961	21	-1	-1	0	0	0.931
7	-1	1	0	0	0.938	22	0	-1	1	0	0.941
8	1	0	-1	0	1.001	23	0	0	0	0	1.048
9	-1	0	0	1	0.992	24	0	0	-1	1	1.012
10	0	-1	0	-1	0.948	25	0	0	1	-1	1.021
11	0	0	1	1	1.011	26	0	-1	-1	0	0.952
12	1	0	0	-1	1.018	27	0	1	1	0	0.967
13	0	0	0	0	1.046	28	0	0	0	0	1.053
14	0	0	0	0	1.051	29	-1	0	1	0	0.978
15	-1	0	-1	0	0.978						

表 4 烟丝综合质量回归分析模型方差分析表[†]
Table 4 Analysis of variance analysis of tobacco comprehensive quality regression analysis model

变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	0.04	14	3.10E-03	109.23	<0.000 1	* *
A	1.37E-03	1	1.37E-03	48.17	<0.000 1	* *
B	4.20E-04	1	4.20E-04	14.82	0.001 8	* *
C	3.33E-05	1	3.33E-05	1.18	0.296 5	
D	7.50E-07	1	7.50E-07	0.03	0.873 1	
AB	2.50E-07	1	2.50E-07	8.82E-03	0.926 5	
AC	1.23E-05	1	1.23E-05	0.43	0.521 6	
AD	2.78E-17	1	2.78E-17	9.79E-13	1.000 0	
BC	1.82E-04	1	1.82E-04	6.43	0.023 8	*
BD	6.25E-06	1	6.25E-06	0.22	0.645 9	
CD	2.50E-05	1	2.50E-05	0.88	0.363 6	
A ²	7.44E-03	1	7.44E-03	262.50	<0.000 1	* *
B ²	0.04	1	0.04	1 356.66	<0.000 1	* *
C ²	3.39E-03	1	3.39E-03	119.67	<0.000 1	* *
D ²	1.23E-03	1	1.23E-03	43.22	<0.000 1	* *
残差	3.97E-04	14	2.83E-05			
失拟项	3.52E-04	10	3.52E-05	3.11	0.142 7	不显著
纯误差	4.52E-05	4	1.13E-05			
总离差	0.04	28				

[†] * * 表示极显著(P<0.01); * 表示显著(P<0.05); R²=0.990 9; R_{adj}²=0.981 9。

通过表 4 模型回归分析结果可以看出,回归模型 P<0.000 1,表明回归模型达到极显著水平;方程决定系数 R²=0.990 9,表明该方程拟合度较高,可用该模型对膨胀烟丝综合质量的情况进行分析和预测;失拟项 F=3.11, P=0.142 7>0.05,表明回归模型失拟不显著,表明此模型试验误差小,可以用来预测膨胀烟丝

加工综合质量。其中 A、B 的 P 值 < 0.05 , 表明浸渍时间和工艺气温度对膨胀烟丝综合质量有显著影响, 4 个因素影响顺序是浸渍时间 $>$ 工艺气温度 $>$ 热风风速 $>$ 蒸汽施加量。

2.3.2 各因素的交互作用及优化 根据回归模型绘制各因素交互作用曲面图(图 2)。浸渍时间、工艺气温度、热风风速和蒸汽施加量四因素及其交互作用对响应值的影响结果可通过该组图直观反映出来。对该响应面模型进

一步求导和解逆矩阵, 可以得到膨胀烟丝综合质量的极值点, 即浸渍时间 41.60 s、工艺气温度 290.82 $^{\circ}\text{C}$ 、热风风速 38.10 m/s 和蒸汽施加量 500.37 kg/h, 在此条件下, 模型预测膨胀烟丝综合质量可达 1.052。根据实际生产情况, 选取浸渍时间 42 s、工艺气温度 291 $^{\circ}\text{C}$ 、热风风速 38 m/s 和蒸汽施加量 500 kg/h 的条件下对其模型进行验证, 实验进行 3 次重复, 测得膨胀烟丝综合质量平均值为 1.051, 与预测基本一致。

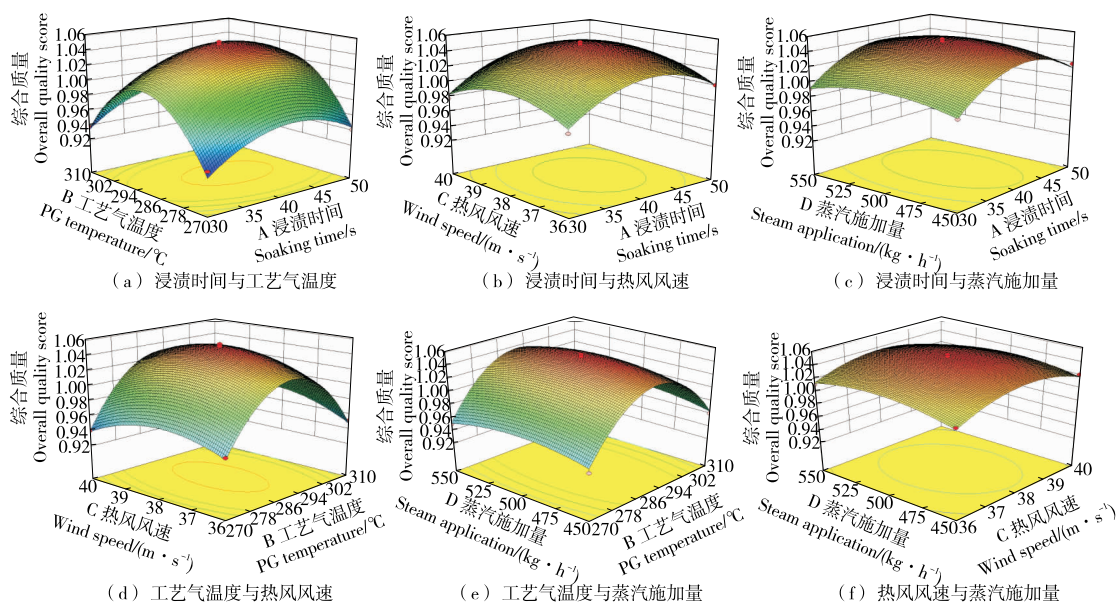


图 2 各因素交互作用图

Figure 2 Interaction diagram of various factors

3 结果

通过对膨胀烟丝工艺参数进行优化研究, 得到最佳加工工艺参数为: 浸渍时间 42 s、工艺气温度 291 $^{\circ}\text{C}$ 、热风风速 38 m/s、蒸汽施加量 500 kg/h, 综合质量得分为 1.052。相较于传统的对单一质量指标进行评价, 此种评价方法更加全面, 也更有利于指导膨胀烟丝工艺加工。

但试验只对膨胀烟丝单一产品进行了研究, 而膨胀烟丝作为卷烟产品的一种重要组分, 在与卷烟产品的配伍性方面的研究今后还需作更深次的研究。同时试验对膨胀烟丝综合质量的研究未考虑对化学成分的影响, 也是后期可进一步研究的方向。

参考文献

[1] 赵玉洁, 熊安言. CO_2 烟丝膨胀线工艺参数与膨胀烟丝化学成分关系探讨[J]. 作物研究, 2015, 29(8): 879-881.
[2] 牛勇, 邹鹏, 舒俊生, 等. 二氧化碳膨胀处理对烟丝部分香味成分的影响[J]. 烟草科技, 2014(9): 57-60, 72.
[3] 张建勋, 王镇增, 熊安言, 等. 改善 CO_2 膨胀烟丝结构的探

讨[J]. 烟草科技, 2000(12): 3-4.

[4] 徐俊, 邹鹏, 郭东峰, 等. 二氧化碳膨胀处理对烟丝物理结构的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2015, 42(4): 638-641.
[5] 熊安言, 王二彬, 宋伟民, 等. CO_2 叶丝膨胀线工艺参数与烟气成分的影响[J]. 食品与机械, 2015, 31(6): 53-55.
[6] 康金岭, 范燕玲. 干冰膨胀工艺参数对膨胀烟丝整丝率的影响[J]. 食品与机械, 2013, 29(3): 246-249.
[7] 陶永峰, 张胜华, 李文璟, 等. 基于层次分析法和灰色关联分析的评价模型在卷烟多点加工质量评价中的应用[J]. 中国烟草学报, 2017, 23(1): 43-48.
[8] 刘淑婷, 王颖, 沈琰, 等. 豆基杂粮米稀挤压膨化工艺优化[J]. 食品与机械, 2019, 35(10): 218-222.
[9] 杨玉兰, 杨萍, 姜文侠, 等. 利用响应面分析法进行氨肽酶发酵培养基的优化[J]. 食品研究与开发, 2012, 33(11): 176-180.
[10] 高洁, 王勇, 董文宾, 等. 响应面法优化优化超临界 CO_2 提取大都胚芽油工艺研究[J]. 粮油与油脂, 2019, 32(2): 53-56.
[11] 张修世, 杨东亚. 灰色关联分析法在卷烟产品同质化评价中的应用[J]. 阜阳师范学院学报: 自然科学版, 2009, 26(4): 66-68.