

烟支烟柱段吸阻稳定性影响因素改善研究

陈 怡 李 康

安徽中烟工业有限责任公司合肥卷烟厂 安徽 合肥 230000

摘 要: 本研究以某牌名卷烟为对象,综合单支质量、圆周、硬度、长度、滤棒压降、烟丝填充值及含水率等参数,构建多元回归预测模型。结果表明:单支质量、滤棒压降和含水率是显著正向主效应因素;烟丝填充值虽非独立显著,但与主效应存在显著交互作用。基于模型优化可精准设定工艺参数,有效将吸阻稳定控制在目标范围。该研究为卷烟吸阻的精准调控提供了理论支撑与实用技术路径,对提升质量稳定性、降低消耗具有重要实践价值。

关键词: 卷烟吸阻;多元回归;物理指标;交互效应;稳定性控制

引言

卷烟吸阻是影响燃烧性能、烟气成分及感官质量(如刺激性、香气)的关键物理指标,其稳定性控制是卷烟工艺优化的重点与难点。当前行业主要通过调节烟柱段净含丝量控制吸阻,但多依赖单一参数建模,忽视多因素交互作用,难以满足智能制造对高精度、高均质化生产的需求。随着消费者对品质要求提升,传统单因素策略已显不足。本研究在前期基础上,系统整合单支质量、圆周、滤棒压降、烟丝填充值及含水率等多维参数,构建多元回归模型,深入解析各因素及其交互效应对吸阻的影响机制。成果不仅为吸阻精准调控提供理论依据与技术路径,还推动工艺优化向智能化发展,为构建闭环智能控制系统奠定基础,对提升产品质量稳定性与生产效率具有重要实践价值。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设备

卷烟样品:烤烟型卷烟某牌名卷烟,规格为84mm。

生产设备:ZJ17卷接机组(硬3#机台)、KDF2成型机。

滤棒:CA100滤棒。

检测设备:QTM综合测试台(英国斯茹林公司),具备质量、圆周、长度、吸阻、硬度等物理指标的自动测量功能。

分析软件:Minitab 17统计分析软件。

1.2 试验方法

所有试验均在标准大气环境(温度 $22\pm 2^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $60\%\pm 5\%$)下进行,以确保数据的可比性。为最大限度地排除批次间差异的干扰,所有试验均采用同一批次的烟丝、卷烟纸、成型纸等原辅材料。

1.2.1 物理指标调整试验

以基准烟(烟支长度84mm、圆周24.3mm、滤嘴长度25mm)为基础,将卷烟的单支质量和圆周分别设置为高、低两个梯度。在同一卷烟机台上,每天随机抽取30支样品,连续取样10天,共获得600个样本用于分析单支质量、

圆周、硬度、长度等物理指标对吸阻的影响^[1]。

1.2.2 滤棒压降调整试验

固定其他条件,仅改变滤棒压降。设计了三个不同的滤棒压降梯度(基准值为2800Pa),同样在硬3#机台上连续10天取样,每天30支,研究滤棒压降对卷烟总吸阻的影响规律。

1.2.3 烟丝物性调整试验

重点考察烟丝本身的物性参数——填充值和含水率对吸阻的影响。设计了5个水分梯度和4个填充值梯度,使用同一种配方烟丝,在硬3#机台上进行交叉试验。烟丝含水率采用2小时烘箱法(GB/T 22838.8—2009)测定,填充值按照行业标准(YC/T 152—2001)测定。

1.2.4 检测标准

所有卷烟和滤棒样品在测试前均按照国家标准(GB/T 16447—2004)进行充分的环境平衡^[2]。烟丝物性参数取自贮丝柜出口处的5个均匀样本的平均值,以保证数据的代表性。

2 结果与讨论

2.1 多元回归分析模型的建立

本研究利用Minitab 17软件对采集的海量数据进行多元线性回归分析,旨在量化各因素对卷烟吸阻的影响程度,并构建预测模型。

2.1.1 不同物理指标下的卷烟吸阻变化

对单支质量、圆周、硬度、长度四个物理指标进行回归分析(见表1)。结果显示,单支质量($P=0.000$)和圆周($P=0.004$)的P值均小于0.05,是影响吸阻的显著因素。回归方程表明,单支质量与吸阻呈显著正相关,即烟支越重,吸阻越大;而圆周与吸阻呈负相关,即烟支越粗,吸阻越小。相比之下,烟支长度和硬度的P值远大于0.05,说明它们在本研究条件下对吸阻无显著影响。该初步模型的相关系数($R-Sq$)为70.22%,表明物理指标能在一定程度上解释吸阻的变化。

表1：卷烟各项指标与卷烟吸阻的回归系数表

项	系数	T值	P值	F值	S值	R-Sq/%	R-Sq (调整)/%
常量	6735	1.38	0.181				
单支质量	1435	4.34	0.000	18.84			
圆周	-214.7	-3.13	0.004	9.79	17.5982	70.22	65.45
硬度	2.13	1.54	0.136	2.37			
长度	-22.1	-0.43	0.674	0.18			

2.1.2 单支质量对吸阻的精细化影响

为进一步验证单支质量的影响，在其工艺标准范围（0.815-0.945g）内进行配对T检验。结果（见表2）显示，不同质量水平下的吸阻均值、过程能力指数（CPK）和

标准偏差的P值均小于0.05，证明控制单支质量能显著影响吸阻的中心位置和离散程度^[3]。当质量接近上限时，吸阻显著增大，甚至可能超出工艺标准，导致不合格品率上升和烟丝浪费。

表2：单支烟支质量对吸阻均值、标准偏差、CPK的影响

参数	样本量	均值	标准差	R-Sq/%	P值
吸阻均值(单支质量大)/Pa	21	1083	21.9	88.4	0.000
吸阻均值(单支质量小)/Pa	21	1051	17.6		
吸阻CPK(单支质量大)	21	1.3	0.2	0.00	0.001
吸阻CPK(单支质量小)	21	1.7	0.4		
吸阻标准偏差(单支质量大)	21	43.5	7.8	0.00	0.019
吸阻标准偏差(单支质量小)	21	37.6	6.7		

2.1.3 烟支圆周对吸阻的影响

同样采用配对T检验分析圆周（24.20-24.60mm）的影响。结果（见表3）表明，圆周对吸阻均值和标准偏

差有统计学意义（ $P < 0.05$ ），但其相关系数仅为2.1%和8.9%，说明其影响虽存在，但强度远弱于单支质量。

表3：烟支圆周对吸阻均值、标准偏差、CPK的P值大小

参数	样本量	均值	标准差	R-Sq/%	P值
吸阻均值(圆周大)/mm	21	1069	21.1	2.10	0.007
吸阻均值(圆周小)/mm	21	1051	17.6		
吸阻CPK(圆周大)	21	1.4	0.3	0.00	0.778
吸阻CPK(圆周小)	21	1.3	0.3		
吸阻标准偏差(圆周大)	21	45.3	7.2	8.90	0.039
吸阻标准偏差(圆周小)	21	40.4	5.3		

2.1.4 滤棒压降、含水率与填充值的影响

在烟支质量、圆周及车速恒定条件下，研究“新制皖烟”卷烟吸阻随滤棒压降、烟丝含水率和填充值的变化规律。多元回归分析显示：滤棒压降与吸阻呈显著正相关（ $R^2 > 86.8\%$ ），即压降越大，吸阻越高；烟丝含水率同样对吸阻有显著正向影响（ $R^2 > 88.83\%$ ），含水率越高，吸阻越大。所得回归方程分别为：吸阻 = $779 + 0.267 \times$ 填充值；吸阻 = $242.1 + 0.7730 \times$ 含水率。结果表明，滤棒压降和烟丝含水率是影响吸阻的关键因素。

互效应至关重要：（1）显著正向交互：含水率-单支质量、单支质量-填充值、单支质量-滤棒压降-填充值。这意味着，例如，当单支质量较大时，含水率对吸阻的正向影响会被放大。（2）显著负向交互：含水率-滤棒压降-填充值、单支质量-滤棒压降-填充值。这表明在某些参数组合下，因素间的相互作用会抵消部分主效应^[4]。最终的综合回归模型具有极高的拟合优度，R-Sq（调整）高达99.37%以上，说明该模型能够非常准确地捕捉和预测吸阻的变化规律。

2.2 综合模型的构建与分析

鉴于各因素可能存在复杂的交互作用，本研究构建了一个包含主效应和交互项的综合回归模型。

2.2.1 模型识别与排序

通过对各单因素模型的回归系数进行排序，初步确定含水率、滤棒压降、单支质量、填充值为主要影响因素。

2.2.2 交互效应分析

绘制Pareto图（图1）并分析回归系数表（表4），发现交

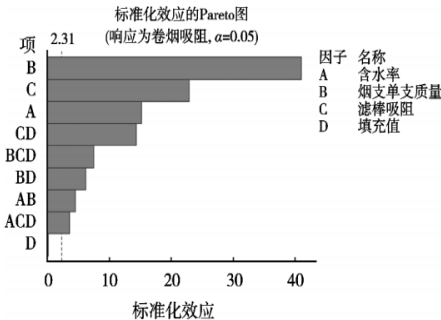


图1：卷烟吸阻综合模型的Pareto图

表4: 滤棒压降、含水率、单支烟支质量及其交互作用与卷烟吸阻的回归系数表

项	F值	P值	T值	R-Sq/%	R-Sq(调整)/%
含水率	231.77	0.000	15.22		
单支烟支质量	1677.29	0.000	40.95		
滤棒压降	526.39	0.000	22.94		
含水率-单支烟支质量	20.28	0.002	4.50		
单支烟支质量-填充值	38.67	0.000	6.22	99.72	99.37
滤棒压降-填充值	206.39	0.000	-14.37		
含水率-滤棒压降-填充值	13.29	0.000	-3.65		
单支烟支质量-滤棒压降-填充值	56.32	0.000	7.50		

2.2.3 模型验证

通过残差分析(图2、3)对模型的有效性进行检验。残差图显示,残差随机分布、无明显模式、符合正态性假设且方差齐性,充分证明了该综合模型的稳健性和可靠性。

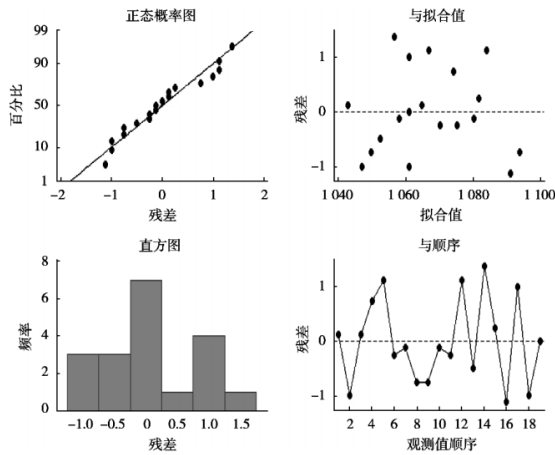


图2: 卷烟吸阻综合模型的残差图

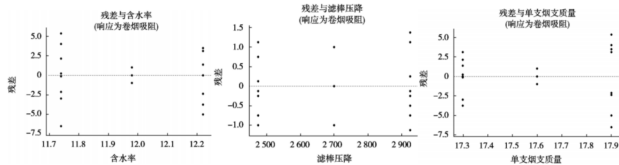


图3: 残差对于含水率、滤棒压降、单支烟支质量的散点图

2.2.4 模型预测与优化

利用该模型进行最优化设计,以寻找使吸阻达到目标值(如1050Pa或950Pa)的最佳参数组合。模型可以精准给出对应的含水率、滤棒压降、单支质量和填充值的最优设定值。例如,当目标吸阻为1050Pa时,最优参数组合为:含水率11.85%、滤棒压降2475Pa、单支质量0.873g、填充值4.7cm³/g。模型预测的95%置信区间也证实了其预测结果的高度可信性。

3 研究结论

本研究通过对某牌名卷烟的系统性试验与多元回归分析,得出了以下核心结论:(1)主效应显著:单支烟支质量、滤棒压降、烟丝含水率是影响卷烟吸阻的三个

最显著的主效应因素,且均为正相关关系。其中,单支质量是最直接、最有效的现场控制手段。(2)交互效应关键:烟丝填充值虽不表现为独立的显著主效应,但其与单支质量、滤棒压降、含水率之间的交互作用对吸阻稳定性具有决定性影响。忽视这些交互效应,将无法实现真正的精准控制。(3)高精度模型可行:成功构建了一个包含主效应和关键交互项的多元回归综合模型,该模型调整后R²超过99.37%,拟合效果极佳,能够为生产提供可靠的预测和优化指导。(4)优化路径清晰:通过模型优化,可以明确地找到达成特定吸阻目标所需的各工艺参数最优组合,为实现吸阻的主动、稳定控制提供了量化依据。

4 结语

本研究创新性地构建统一框架,系统量化烟丝物性、卷接指标与滤棒压降等全链条因素对卷烟吸阻的综合及交互影响,为合肥卷烟厂ZJ17机型提供精准控制方案,并树立行业研究新范式。未来可从四方面拓展:一是验证模型在不同牌号及细支、中支等产品中的普适性;二是融合在线重量、水分、圆周等实时数据,开发闭环智能吸阻控制系统,实现事前预测与事中调控;三是强化制丝一卷接协同,通过精准控制烘丝水分与热风温度等关键参数,从源头保障烟丝稳定性;四是引入支持向量机、随机森林等机器学习算法,提升模型对非线性关系的拟合能力与预测精度。

参考文献

[1]朱宁宁,李志强,王建军,等.影响卷烟吸阻变化的多因素研究[J].食品工业,2023,44(5):132-136.
[2]韩利强,张明远,刘伟,等.偏差预测与参数优化相结合的卷烟卷制质量整合控制[J].包装工程,2023,44(11):45-51.
[3]段青娜,陈立新,赵永强,等.基于正交法和经验法提升二元复合滤棒吸阻稳定性的研究[J].价值工程,2023, 42(15): 112-115.
[4]胡素霞,郑伟,林志强,等.基于选择稳定性优化的卷烟吸阻快速预测[J].安徽农业大学学报,2023,50(2):215-221.