

基于DOE全因子试验的ZB418包装机烟支挤压变形率控制研究

李柯璇, 李 穗, 周星宇, 周婵昱, 刘洪明, 李春林

玉溪卷烟厂, 云南 玉溪

收稿日期: 2026年1月22日; 录用日期: 2026年2月24日; 发布日期: 2026年3月13日

摘 要

针对高速卷烟包装过程中异形烟支(双铝包结构)在机械通道内的挤压变形问题, 本文以ZB418型包装机组为研究对象, 深入分析了烟包在成型与输送环节的运动学特性及受力状态。通过对生产现场的大样本数据统计与工艺环节分层测试, 揭示了内衬及商标纸成型组件是导致烟支塑性变形的关键区域。基于机械接触力学理论, 识别出干燥轮模盒宽度与内衬成型通道宽度为影响变形率的关键几何参数。采用全因子试验设计(DOE)方法, 研究了关键参数对变形率的交互影响规律, 确定了最佳工艺参数组合(干燥轮模盒宽度61.6 mm, 内衬成型通道宽度32.0 mm)。工程应用结果表明, 改进后的工艺参数使烟支挤压变形率从0.46%显著降低至0.092%, 降幅达80%, 有效提升了产品外观质量稳定性与生产效率, 为同类高速包装设备的精密控制提供了理论依据与技术范式。

关键词

ZB418包装机, 双铝包烟支, 挤压变形, 接触力学, 全因子试验, 参数优化

Research on Cigarette Extrusion Deformation Rate Control of ZB418 Packaging Machine Based on DOE Full Factorial Experiment

Kexuan Li, Sui Li, Xingyu Zhou, Chanyu Zhou, Hongming Liu, Chunlin Li

Yuxi Cigarette Factory, Yuxi Yunan

Received: January 22, 2026; accepted: February 24, 2026; published: March 13, 2026

文章引用: 李柯璇, 李穗, 周星宇, 周婵昱, 刘洪明, 李春林. 基于 DOE 全因子试验的 ZB418 包装机烟支挤压变形率控制研究[J]. 仪器与设备, 2026, 14(1): 49-54. DOI: 10.12677/iae.2026.141007

Abstract

This paper focuses on the extrusion deformation problem of irregularly shaped cigarettes (double aluminum pack structure) in the mechanical channel during high-speed cigarette packaging. Taking the ZB418 packaging machine as the research object, it analyzes the kinematic characteristics and stress state of the cigarette pack during the forming and conveying stages. Through large-sample data statistics from the production site and layered testing of process stages, it is revealed that the inner liner and label paper forming components are the key areas leading to the plastic deformation of the cigarette. Based on the theory of mechanical contact mechanics, the width of the drying wheel mold box and the width of the inner liner forming channel are identified as key geometric parameters affecting the deformation rate. Using the design of full factorial experiment (DOE) method, the interaction law of key parameters on the deformation rate is studied, and the optimal combination of process parameters (drying wheel mold box width 61.6 mm, inner liner forming channel width 32.0 mm) is determined. Engineering application results show that the improved process parameters significantly reduced the cigarette extrusion deformation rate from 0.46% to 0.092%, a reduction of 80%, effectively improving the stability of product appearance quality and production efficiency. This provides a theoretical basis and technical paradigm for the precision control of similar high-speed packaging equipment.

Keywords

ZB418 Packaging Machine, Double-Aluminum-Coated Cigarettes, Extrusion Deformation, Contact Mechanics, Full Factorial Experiment, Parameter Optimization

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 绪论

1.1. 研究背景

随着烟草工业“智能制造”战略的推进,卷烟包装设备正向着超高速、高柔性与高精度的方向发展。近年来,为满足消费市场的多元化需求,双铝包(双内仓)结构的中支卷烟逐渐成为高端产品的主流形态。然而,相较于传统单包结构,双铝包烟支在合流、成型及输送过程中,需经历更为复杂的机械约束与相位匹配,这对包装机的刚性通道精度与柔性烟包的适配性提出了严峻挑战[1]。

在实际生产中,ZB418型包装机组(源自FOCKE机型技术)在处理该类产品时,普遍存在烟支挤压变形率偏高的问题。如图1,这种变形表现为烟支圆度超差、端面褶皱,直接影响生产效率(OEE)与原辅料消耗成本。因此,探究高速工况下烟支变形的动力学成因,并提出精确的控制策略,是提升卷烟制造工艺水平的迫切需求。

1.2. 研究现状

目前,关于高速包装机组的研究多集中在凸轮机构的动力学优化、电气控制系统的响应速度提升等方面[2][3]。在烟支损伤机理方面,部分学者从烟丝填充密度与卷烟纸抗张强度的角度进行了材料学分析[4],但结合机械通道几何约束与运动干涉的系统性工艺研究相对较少。现有的故障处理多依赖维修人员的经验试错,缺乏基于数理统计与实验设计的量化参数优化模型。



Figure 1. Illustration of cigarette extrusion deformation defects
图 1. 烟支挤压变形缺陷图示

1.3. 研究内容

本文依托玉溪卷烟厂卷包三车间的 ZB418 生产线(生产标准中支卷烟, 烟支直径 $\phi 6.37$ mm), 旨在: 通过工艺分层法精准定位导致烟支变形的核心机械组件; 基于尺寸链分析与单因素实验, 筛选影响变形的关键结构参数; 运用全因子试验设计(DOE)优化工艺参数组合, 并研制专用工装实现标准化控制; 验证改进策略的工程有效性与经济效益。

2. 问题描述与机理分析

2.1. ZB418 机组双铝包成型工艺原理

ZB418 机组的包装流程是一个典型的离散事件动态系统。对于双铝包产品, 其核心难点在于“双流合一”后的成型控制。主要工艺路径如下: 两组独立的铝箔烟包在汇流后, 经由推烟板送入商标纸折叠通道, 随后进入干燥轮进行胶水固化与定型。在此过程中, 烟包作为一个由松散烟支组成的柔性体, 需要在刚性的机械模盒与通道中高速滑移。

2.2. 变形缺陷的统计学特征

对车间 7#、8#两台机组进行为期三个月的质量追踪(样本量 $N = 16,164$), 检出挤压变形缺陷 74 次, 平均缺陷率为 0.458%, 远超 0.15%的质量控制限。时域分析显示, 缺陷发生具有连续性, 且在不同班次间无显著差异($P > 0.05$), 表明该问题属于系统性偏差而非随机误差。

2.3. 基于工艺分层的故障源定位

为解耦复杂的机械系统, 本研究采用“工艺分段截取法”进行故障溯源。将包装线划分为内衬及商标纸成型、烟支成型、烟包输送、辅机四个独立子系统, 分别喂入标准样烟进行测试(见表 1)。

Table 1. Test results of the process segmentation interception method
表 1. 工艺分段截取法试验结果

工艺组件	样本数	变形数	组件变形率	贡献占比
内衬及商标纸成型	10,000	39	0.39%	84.80%
烟支成型	10,000	4	0.04%	8.70%
烟包输送	10,000	2	0.02%	4.30%
辅机及其他	10,000	1	0.01%	2.20%

数据表明, “内衬及商标纸成型组件”是造成烟支变形的绝对主因。该组件包含折叠犁、成型通道、干燥轮等关键部件, 是烟包从“软态”向“硬态”转变的定型区, 机械挤压风险最高。

2.4. 变形力学机理分析

烟支在成型通道内的受力可简化为侧向挤压模型。设烟包宽度为 $W_{\text{cigarette}}$ (mm)，机械通道宽度为 W_{channel} (mm)。

当 $W_{\text{channel}} < W_{\text{cigarette}}$ 时，烟包受到侧向压应力 σ ：

$$\sigma = E * W_{\text{cigarette}} - W_{\text{channel}} / W_{\text{cigarette}}$$

其中， E 为烟包整体的等效弹性模量。

由于烟支主要由松散烟丝构成，其径向抗压强度较低。当 σ 超过烟支的屈服极限 σ_s 时，最外侧烟支将发生不可逆的塑性变形(扁头、皱纹)。

反之，若 W_{channel} 过大，烟包在高速输送中会因约束不足而发生位移震荡，导致折叠错位，进而引发下游机构的二次挤压。因此，寻找 W_{channel} 的最优解是解决问题的关键。

3. 关键影响因子的识别与筛选

基于故障树分析(FTA)，初步筛选出 11 项潜在影响因子。为剔除冗余变量，采用“单因素梯度实验法”进行逐一排查。

3.1. 非显著因子的排除

实验结果显示，以下参数在常规调节范围内对变形率无显著影响(显著性水平 $\alpha > 0.05$)：

折叠犁角度：商标折叠犁($60^\circ \sim 64^\circ$)与内衬侧边折叠犁($56^\circ \sim 60^\circ$)的角度变化主要影响折叠平整度，对内部烟支挤压影响微弱。

气动与温度参数：气囊压力($0.3 \sim 0.37$ MPa)与干燥轮温度($26^\circ\text{C} \sim 33^\circ\text{C}$)的变化未引起变形率的趋势性波动。

微量机械间隙：第二往复模盒宽度、并包器靠拢量等参数在 ± 0.2 mm 范围内的波动，被烟包自身的弹性变形所吸收，未表现出明显的致害性。

3.2. 关键因子的锁定

筛选发现，两项几何尺寸参数对变形率具有决定性影响：

因子 A：干燥轮模盒宽度 W_d (mm)

现场实测均值为 61.4 mm。实验表明，当 W_d 从 61.5 mm 减小至 61.2 mm 时，变形率呈指数级上升(0.367%提升至 0.70%)。干燥轮模盒作为烟包胶水固化的保压工位，其宽度直接决定了成型后的烟包几何尺寸。过小的宽度会导致模盒壁对烟包施加持续的高压应力。

因子 B：内衬成型通道宽度 W_c (mm)

现场实测均值为 31.8 mm。实验显示，当 W_c 小于 31.9 mm 时，变形率显著升高；当 W_c 接近 32.0 mm 时，变形率趋于平稳低值。该通道是双包合拢后的第一道刚性约束，其尺寸匹配度直接影响烟包进入后续工序的姿态稳定性。

4. 基于全因子试验的参数优化

鉴于 W_d 与 W_c 存在潜在的耦合效应(干燥轮定型尺寸影响后续在通道内的通过性)，单纯的单因素优化无法获取系统最优解。因此，引入全因子试验设计(Full Factorial Experiment Design)进行多参数寻优。

4.1. 试验设计

选取因子 A (W_d)和因子 B (W_c)各 4 个水平进行全排列组合试验($4^2 = 16$ 组)。

因子 A (W_d)水平: 61.55 mm, 61.60 mm, 61.65 mm, 61.70 mm。

因子 B (W_c)水平: 31.95 mm, 32.00 mm, 32.05 mm, 32.10 mm,

每组试验样本量设定为 1000 支, 重复 5 次取平均值。

4.2. 结果分析

试验数据(见表 2)显示, 变形率随参数变化呈现明显的“盆底效应”。

Table 2. Results data of some key experimental groups

表 2. 部分关键试验组结果数据

试验组号	A: W_d (mm)	B: W_c (mm)	平均变形数(支)	变形率(%)
1	61.55	31.95	1.8	0.18
6	61.60	32.00	1.0	0.10
11	61.65	32.05	1.8	0.18
16	61.70	32.10	2.2	0.22

分析结论:

极值点分析: 在组合(A = 61.6, B = 32.0)处, 变形率达到全局最小值 0.10%。

交互效应: 当 W_d 增大时(>61.7), 虽然挤压力减小, 但烟包过于松散, 导致在 W_c 通道内发生碰撞震荡, 反而增加了变形率; 当 W_c 过小(<32.0)时, 无论 W_d 如何调整, 通道入口处的剪切挤压始终存在。

最优参数确定: 确定工艺参数目标值为: 干燥轮模盒宽度 61.60 ± 0.02 mm, 内衬成型通道宽度 32.00 ± 0.02 mm。

5. 改进实施与标准化控制

5.1. 机械结构的精密调整

针对确定的最优参数, 实施了以下工程改进:

干燥轮模盒修整: 对模盒内壁进行精密研磨, 去除微观毛刺, 并利用高精度内径千分尺监控, 确保所有工位模盒宽度统一至 61.60 mm。

内衬通道标准化: 摒弃了以往依靠塞尺或经验敲击的粗放调节方式。

工装研制: 如图 2, 设计并制造了硬度 HRC58、表面粗糙度 Ra0.4 的专用“H 型”标准量块(宽度 32.00 mm)。



Figure 2. Adjusting the tooling

图 2. 调整工装

调节工艺:在停机状态下,将量块置入通道,调整侧壁导轨直至与量块形成微过盈配合(阻尼感适中),锁紧螺栓。

5.2. 效果验证

在改进实施后的三个月内,对机组进行了持续跟踪监测。

质量指标:7#、8#机组的月平均烟支变形率分别为 0.10%、0.09%、0.086%,总均值 0.092%。相比改进前的 0.46%,降幅达 80%,且过程能力指数(Cpk)显著提升。

症结消除:内衬及商标纸成型组件的缺陷发生率由 84.8%降至 31.6%,不再是短板环节。

稳定性验证:在连续 4 天的满负荷运行测试中,未发生因通道堵塞导致的停机事故,机械结构运行平稳。

5.3. 经济效益分析

基于生产数据测算,改进后单台设备月均减少翻箱 8.1 箱。按当前原辅料单价计算,每年单台设备可节约直接材料成本约 20.8 万元。同时,故障停机时间的减少(由 444 h/月降至 89 h/月)带来了约 398%的故障处理效率提升,显著释放了产能。

6. 结论

本文针对 ZB418 包装机双铝包烟支挤压变形问题,提出了一套基于机理分析与数据驱动的系统性解决方案。主要结论如下:

机理明确:证实了内衬及商标纸成型组件的几何尺寸失配是导致高速工况下烟支塑性变形的根本原因。

参数量化:通过全因子试验,精确定量了干燥轮模盒与内衬成型通道的最佳尺寸配合关系(61.6 mm/32.0mm),打破了经验调节的局限性。

方法创新:研制的专用标准量块与配套调整工艺,实现了复杂机械参数的“防差错”与“标准化”控制,极大降低了对维修人员个人技能的依赖。

工程价值:该成果在玉溪卷烟厂的应用证明了其显著的质量效益与经济价值,为行业内同类进口设备的国产化适应性改造提供了可借鉴的工程经验。

未来的研究工作将进一步探索基于机器视觉的烟支变形在线监测技术,结合自适应控制算法,实现包装通道宽度的动态主动调节,以适应不同批次烟支物理特性的微小波动。

参考文献

- [1] 陈良元. 卷烟机械设计[M]. 北京:中国科学技术出版社,2018:245-250.
- [2] 张伟,李军. ZB45 包装机烟支供给系统的动力学仿真与优化[J]. 机械工程学报,2021,57(8):112-118.
- [3] Wang, H. and Liu, Y. (2020) Optimization of High-Speed Packaging Mechanism Based on Flexible Multibody Dynamics. *Applied Sciences*, **10**, Article 1523.
- [4] 刘洋. 卷烟包装过程中的烟支物理损伤机理研究[D]:[硕士学位论文]. 郑州:郑州大学,2019.