

基于弹性压紧机构的2000Y包装机内框纸定位裁切缺陷控制研究

李骥鹏*, 和 顺, 杨 涛

红塔烟草(集团)有限责任公司玉溪卷烟厂, 云南 玉溪

收稿日期: 2026年5月28日; 录用日期: 2026年7月3日; 发布日期: 2026年9月15日

摘 要

针对2000Y型高速硬盒卷烟包装机在生产红塔山(细支传奇) 90 mm细支卷烟过程中, 内框纸对中裁切偏移、翘边、露白等缺陷频发, 导致整机废品率偏高、原辅材料损耗大、设备有效作业率偏低等工程实际问题, 开展缺陷机理分析、关键要因辨识、控制机构设计与工业应用验证研究。通过对2025年1~3月生产现场数据统计、缺陷分类与溯源分析, 确定内框纸对中裁切缺陷为主要质量症结, 缺陷率达0.71%, 占总废品量的51.8%。采用人、机、料、法、环、测六维度鱼骨图法全面解析潜在影响因素, 经现场梯度试验、量化测试与统计分析, 最终确定对中裁切工位压辊轮压紧力不足、内框纸高速输送过程抖动偏大是造成定位失准、裁切偏移的核心要因。据此设计一种适用于细支烟高速包装工况的新型内框纸弹性压紧弹片机构, 选用38CrMoAl渗氮钢为结构材料以保证耐磨性与尺寸稳定性, 通过双因素交互试验优化弹片形状与安装位置, 确定最优结构组合。现场工业应用结果表明: 加装弹性压紧机构后, 内框纸对中裁切缺陷率由0.71%降至0.047%, 下降幅度达93.4%; 整机废品率由1.37%降至0.68%, 下降幅度达50.4%; 年节约原辅材料成本128.06万元。该改造方案无需改动主机结构、安装便捷、运行稳定可靠、无安全与质量风险, 可在同类型2000Y包装机及90 mm、100 mm细支烟高速包装设备上推广应用。研究成果可为卷烟高速包装工序内框纸输送定位系统改进提供工程参考与技术支持。

关键词

内框纸, 定位裁切, 缺陷控制, 细支卷烟

Research on the Control of Inner Frame Paper Positioning and Cutting Defects of the 2000Y Packaging Machine Based on Elastic Clamping Mechanism

Jipeng Li*, Shun He, Tao Yang

*通讯作者。

文章引用: 李骥鹏, 和顺, 杨涛. 基于弹性压紧机构的 2000Y 包装机内框纸定位裁切缺陷控制研究[J]. 仪器与设备, 2026, 14(3): 405-412. DOI: 10.12677/iae.2026.143044

Abstract

Focusing on the 2000Y high-speed hard-pack cigarette packaging machine during the production of Hongta Mountain (Slim Legend) 90 mm slim cigarettes, defects such as misalignment, edge lifting, and white exposure of the inner frame paper occur frequently, resulting in high overall machine scrap rates, excessive loss of raw and auxiliary materials, and low effective equipment operation rates. This study conducts research on defect mechanism analysis, key factor identification, control mechanism design, and industrial application verification. Through statistical analysis, defect classification, and traceability study of on-site production data from January to March 2025, the inner frame paper alignment cutting defect was identified as the primary quality issue, with a defect rate of 0.71%, accounting for 51.8% of total scrap. Using a six-dimensional fishbone analysis method considering man, machine, material, method, environment, and measurement factors, combined with on-site gradient testing, quantitative measurement, and statistical analysis, it was ultimately determined that insufficient roller pressure at the alignment cutting workstation and excessive vibration of the inner frame paper during high-speed conveyance were the core causes of misalignment and cutting deviation. Accordingly, a new elastic clamping spring mechanism for the inner frame paper was designed for high-speed slim cigarette packaging conditions. 38CrMoAl nitrided steel was selected as the structural material to ensure wear resistance and dimensional stability, and the spring shape and installation position were optimized through two-factor interaction tests to determine the optimal structural combination. On-site industrial application results show that after installing the elastic clamping mechanism, the internal frame paper alignment cutting defect rate dropped from 0.71% to 0.047%, a reduction of 93.4%; the overall machine scrap rate decreased from 1.37% to 0.68%, a decrease of 50.4%; and the annual saving in raw and auxiliary material costs reached 1.2806 million yuan. This modification plan does not require changes to the main machine structure, is easy to install, operates stably and reliably, and poses no safety or quality risks. It can be promoted and applied to similar 2000Y packaging machines and high-speed packaging equipment for 90 mm and 100 mm slim cigarettes. The research results provide engineering reference and technical support for improving the inner frame paper conveyance and positioning system in high-speed cigarette packaging processes.

Keywords

Inner Frame Paper, Precise Cutting, Defect Control, Slim Cigarettes

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. 引言

近年来,细支卷烟以其外观精致、吸食柔和、消耗更低、风格时尚等特点,在国内卷烟市场保持稳定增长,成为行业产品结构优化与高质量发展的重要方向[1]。红塔山(细支传奇)作为玉溪卷烟厂 90 mm 细支烟主力规格,凭借稳定的感官质量与较高的性价比,在市场中形成了稳定的消费群体,产销规模持续提升[2]-[4]。2000Y 型高速硬盒包装机是国内细支烟包装领域国产化主力机型,整机设计时速 400 包

/min，自动化程度高、工艺适应性强，但设备内框纸输送裁切系统在细支薄型框架纸工况下暴露出定位稳定性短板，长期存在内框纸对中裁切偏移、翘边、露白、输送抖动等缺陷。

内框纸裁切跑偏根源为高速纸路张力波动与结构振动，国内外在柔性纸路张力、抑振领域已有大量研究。在造纸装备领域，福伊特(Voith)、ABB 依托伺服浮动辊技术实现大型纸机闭环张力调控，成套电控改造成本高、占地大，难以适配卷烟紧凑型包装设备狭小空间；国外学者基于激光单点采集方案开展薄纸张力检测，但单点采样无法管控全幅面局部窜动。国内中南大学团队采用自抗扰算法优化复卷机张力控制系统，但硬件升级投入偏高，不适用于卷烟设备低成本技改[5]。

烟草包装细分领域现有优化分为三类：一是负压吸附改造，施琦等针对 ZB45 内衬纸负压风道优化，但 2000 裁切工位空间受限无法加装大功率负压装置[6]；二是原辅材料改性，国内学者围绕框架纸理化指标开展上机适配研究，仅能改善原料固有翘曲，无法消除设备压紧不足带来的动态抖动[7]；现场常用弹簧增压、刚性挡板同样存在疲劳失效、卡纸弊端。

综上，现有方案或电控改造成本高，或仅从原料/刚性限位入手，缺少低成本、小改动、双向抑振的机械式弹性压紧结构，尤其缺少适配 2000Y 细支机型弹片量化设计研究(本文创新点)。本文对比四种技改方案后确定弹性弹片方案，经材质选型+双因素试验优化结构，构建复合压紧机构，填补机型技改空白[8]。

2. 现状分析与问题界定

2.1. 生产数据统计与缺陷分布

以玉溪卷烟厂卷包二车间 D4#2000Y 包装机为研究对象，采集 2025 年 1~3 月红塔山(细支传奇)实际生产数据，对产量、废品总量、缺陷类型及占比进行统计，结果如表 1 所示。

Table 1. Statistics on waste products produced by the 2000Y packaging machine (average from January to March)
表 1. 2000Y 包装机生产废品统计(1~3 月平均值)

缺陷类型	内框纸对中 裁切缺陷	空头烟支	裹包时间 过长	辅料自动 搭接	五轮入口 堵塞	盒片涂胶 不全	抽出器出 口堵塞	内框纸变 形	其他
废品率/%	0.71	0.24	0.16	0.06	0.05	0.05	0.03	0.03	0.04
占比/%	51.8	17.5	11.7	4.4	3.6	3.6	2.2	2.2	3.0

由表 1 可知，内框纸对中裁切缺陷占总废品比例高达 51.8%，是造成整机废品率偏高的最主要因素。该机组平均废品率为 1.37%，显著高于同车间生产玉溪(鑫中支)的同类型机组(内框纸缺陷率仅 0.04%)，同时远低于本机组历史最佳水平(0.06%)，质量提升空间显著。

2.2. 内框纸裁切缺陷的危害

- 内框纸定位偏移与裁切误差会引发多维度质量风险，经现场测试与环境试验验证，主要危害如下：
- (1) 外观质量严重受损内框纸横向偏移 $\geq 0.3\text{ mm}$ 时，小盒包装出现露边、翘角、边缘不齐、裁切不对称等缺陷，不符合卷烟包装一级品标准。统计显示，此类外观缺陷占内框纸相关废品的 62%，直接影响产品市场形象。
 - (2) 密封防护性能下降裁切尺寸偏差超过 $\pm 0.2\text{ mm}$ 时，烟包封口贴合不紧密，防潮密封性能下降 30% 以上。在湿度 60% 以上环境放置 72 h，烟支含水率超标率达 89%，易发生霉变、口感劣变、香气散失等问题，严重影响产品储存期稳定性。
 - (3) 烟支固定与支撑失效内框纸定位偏移导致烟包内部支撑不均、空间错位，烟支晃动、挤压概率增

加 47%，易出现烟丝脱落、滤嘴松动、烟支变形、端部凹陷等问题，影响产品物理质量与吸食安全性。

(4) 消费者使用体验下降翘边、粘连、边缘粗糙会导致开包阻力增大，易出现撕烂包装、内层纸粘连等情况；烟支排列不齐还会影响抽吸姿势与感官质量，用户体验满意度显著降低。

(5) 质量合规与品牌声誉风险缺陷产品不符合《卷烟包装标识 警语的测定 图像》¹强制性要求，存在市场抽检不合格、监管处罚、品牌口碑受损等风险，对品牌长期竞争力造成潜在影响。

2.3. 研究目标确定

综合数据统计、缺陷危害分析、横向对标与历史水平对比，确定研究目标：将内框纸对中裁切缺陷率降至 0.05% 以下，整机废品率降至 0.71% 以下，实现包装质量显著提升、原辅材料消耗明显下降。

3. 缺陷成因分析与要因辨识

3.1. 影响因素全面解析

采用人、机、料、法、环、测六维度鱼骨图法，对“内框纸对中裁切缺陷”进行全因子解析，覆盖设备结构、辅料特性、控制逻辑、操作行为、环境条件、检测方式等全部可能因素。经头脑风暴、现场排查、文献对比与初步筛选，确定 5 项末端影响因素：(1) 内框纸光标色度偏差；(2) 内框纸光标间距偏差；(3) 内框纸厚度偏差；(4) 内框纸宽度偏差；(5) 对中裁切时压辊轮压力不足。

3.2. 要因验证方案

对 5 项末端因素逐一开展现场梯度试验、量化测试、缺陷率统计，以缺陷率变化幅度为核心判断依据：因素变化导致缺陷率波动^{**}≥10%判定为主要原因^{**}，<10%判定为非主要原因。验证方式包括标准样对比、梯度参数试验、高速运行观测、缺陷分类统计、环境重复性验证等。

3.3. 要因验证结果

(1) 内框纸光标色度偏差在标准值 $L^* = 85$ 、 $a^* = 12$ 、 $b^* = 15$ 附近进行梯度偏差试验，分别设置亮度偏差、红绿色度偏差、黄蓝色度偏差等多组水平，结果显示缺陷率波动均小于 10%，对定位裁切影响有限，判定非要因。

(2) 内框纸光标间距偏差在 36.6 ± 0.2 mm 标准范围内变动时，缺陷率无显著上升；超出范围则出现卡纸、停机等问题，但标准公差内影响 <10%，判定非要因。

(3) 内框纸厚度偏差在 0.26~0.34 mm 范围内缺陷率稳定；过厚/过薄易堵塞通道、造成输送卡顿，但标准范围内影响 <10%，判定非要因。

(4) 内框纸宽度偏差在 75 ± 0.5 mm 范围内缺陷率稳定；过宽/过窄会导致输送跑偏、识别失效，但标准范围内影响 <10%，判定非要因。

(5) 对中裁切时压辊轮压力不足设置有无辅助压紧、不同压力梯度对比试验：无压紧：内框纸抖动幅度 1.0~2.0 mm，缺陷率 0.71%；低压力压紧：抖动幅度 0.5~1.0 mm，缺陷率 0.34%；中压力压紧：抖动幅度 0.1~0.5 mm，缺陷率 0.08%；高压压力压紧：纸张易褶皱、刮伤。缺陷率变化幅度远大于 10%，抖动幅度与缺陷率呈显著正相关，判定主要原因。

3.4. 核心成因结论

2000Y 包装机内框纸对中裁切缺陷的唯一主要原因：对中裁切工位压辊轮压紧力不足，高速输送时

¹<https://std.samr.gov.cn/hb/search/stdHBDetailed?id=8B1827F180FFBB19E05397BE0A0AB44A>

内框纸抖动偏大，导致光电定位滞后、裁切位置偏移。其机理为：高速输送下，原有压辊轮无法提供足够夹持力与刚度，内框纸在牵引、输送、定位全过程中发生横向与纵向振动，使光标识别位置与实际裁切位置不匹配，最终形成偏移缺陷。

4. 弹性压紧弹片机构设计与优化

4.1. 设计思路与原则

在确定压辊压紧力不足为核心故障诱因后，课题组围绕抑制内框纸高速抖动、提升夹持稳定性，梳理四种主流整改方案，从改造成本、施工难度、通用性、后期维护、现场适配性五个维度开展技术经济性对比，择优确定最终实施方案，各方案特点如下：

方案 1：原有压辊弹簧预紧力加大改造。通过更换高强度压缩弹簧，提升原配压辊夹持载荷。优点：仅更换标准件、改动少；缺点：弹簧长期高频往复疲劳失效快，压力随磨损持续衰减，压力难以精细化匹配薄型细支内框纸，压力偏大易压伤纸面，偏小无法抑振，长期运行缺陷反弹明显。

方案 2：新增独立伺服压辊机构。加装伺服电机 + 微型压辊，依靠电控实时调节压紧力。优点：压力闭环可控、调节精度高；缺点：需增设驱动、电控布线、改造机架开孔，单台改造成本高(数千元)，占用设备狭小布置空间，车间多机型批量改造投入大，后期需定期标定伺服参数，维保复杂。

方案 3：加装固定式导向限位挡板。在内框纸两侧加装刚性挡板约束横向窜动。优点：结构简单；缺点：只能限制左右偏移，无法抑制上下纵向抖动，纸张厚薄波动时易卡纸、刮破边缘，适配辅料公差范围窄，细支薄纸工况故障率偏高。

方案 4：增设外置弹性弹片辅助压紧(本方案)。依托原压辊基础，在输送通道非印刷面侧加装弹性弹片，形成复合夹持结构。优点：不改动主机传动与机架、无需电气改造、零件加工低廉，依靠材料自身弹性实现自适应压紧，可随内框微小厚薄变化自动微调压量，同时约束横向、纵向双向抖动；缺点：需通过试验优化弹片外形与安装点位。

综合对比，前三种方案分别存在耐用性差、改造成本过高、抑制抖动不全面等短板，弹性弹片方案综合性价比、现场适配性最优，因此确定为本项目最终改进方案。

设计原则：(1) 不刮伤内框纸印刷面与光标区域；(2) 弹性压力适中，不打滑、不褶皱、不卡纸、不损伤纸张；(3) 适配 400 包/min 高速连续运行工况；(4) 安装便捷、通用性强、寿命长、维护简单；(5) 不与原有运动部件发生干涉，不改变设备传动关系。

4.2. 材料选型

弹片工作于高频次弹性接触、高速摩擦、长期循环载荷工况，要求高硬度、高耐磨性、低疲劳、高尺寸稳定性、低摩擦系数。对车间常用结构材料进行性能对比，结果如表 2。

综合硬度、耐磨性、疲劳强度、摩擦特性与成本，最终选用 38CrMoAl 渗氮钢，经表面渗氮处理后硬度高、摩擦系数低、使用寿命长、尺寸稳定，适配高速连续生产。

Table 2. Comparison of the properties of shrapnel materials
表 2. 弹片材料性能对比

材料	硬度	密度/(g·cm ⁻³)	耐磨性	疲劳性能	成本
45 钢	197 HB	7.8	一般	一般	低
2A12 铝合金	120 HB	2.79	较差	一般	中
38CrMoAl (渗氮)	≥920 HV	7.85	优异	优异	中

4.3. 结构参数优化试验

采用双因素交互试验法优化弹片关键参数，以弹片形状与安装位置为变量，因素水平如表 3 所示，以内框纸对中裁切缺陷率为评价指标，每组试验重复 3 次，保持设备速度、辅料、环境一致。

弹片的形状和弹片的安装为两因素，研究不同形状和不同安装位置之间是否有差异，以及之间的交互作用对缺陷率的影响。

Table 3. Factor level table
表 3. 因素水平表

水平	因素	A 弹片形状	B 弹片安装位置
1		a	h
2		b	i
3		c	j

根据因素水平采用试验，每组水平试验 3 次。2024 年 9 月 14~17 日，根据上表的实验设计，小组保持牌号红塔山(细支传奇)、运行速度、试验材料、试验环境均保持一致，正常运行设备 4 天，统计小盒缺陷率。进行有交互作用的双因素方差分析，经过小组统计，形成统计表如表 4 所示：

Table 4. Statistical table of experimental data
表 4. 试验数据统计表

弹片形状	弹片安装位置	缺陷率(%)	弹片形状	弹片安装位置	缺陷率(%)
a	h	1.89	b	i	0.64
a	h	1.88	b	j	0.86
a	h	1.87	b	j	0.87
a	i	1.34	b	j	0.84
a	i	1.3	c	h	1.86
a	i	1.26	c	h	1.96
a	j	1.01	c	h	1.75
a	j	1.19	c	i	1.67
a	j	1.14	c	i	1.59
b	h	0.98	c	i	1.6
b	h	0.86	c	j	1.94
b	h	0.94	c	j	1.86
b	i	0.51	c	j	1.8
b	i	0.62			

试验数据经方差分析显示：(1) 弹片形状主效应显著($F = 550.756, p < 0.01$)；(2) 安装位置主效应显著($F = 85.802, p < 0.01$)；(3) 弹片形状 $\times$ 安装位置交互效应显著($F = 33.906, p < 0.01$)。

经多重比较与简单效应分析，确定最优组合：弹片形状 b+ 安装位置 i。该组合可将内框纸抖动幅度由 1.87 mm 降至 0.1 mm 以内，定位精度满足高速裁切要求。

4.4. 机构结构设计与加工

(1) 完成弹片三维建模与工程图纸设计，确定几何尺寸、弯曲角度、接触弧度、安装孔位；(2) 采用精密线切割加工与渗氮热处理，保证尺寸精度与表面性能；(3) 采用模块化安装，固定于内框纸输送通道指定位置，不破坏原机结构，不改变传动路径。

5. 现场安装、调试与验证

5.1. 安装与调试

2025 年 8 月在 D4#机组完成弹性压紧弹片安装与调试，重点验证内容：(1) 弹片与内框纸非印刷面接触，不损伤光标与印刷层；(2) 弹性压力适中，输送无打滑、无褶皱、无刮痕、无卡纸；(3) 与周边运动部件无干涉，运行无碰撞、无异常噪声；(4) 高速运行(400 包/min)状态稳定，无振动、无松动。

5.2. 目标验证

连续 3 天统计改造后 D4#机组废品率：0.70%、0.66%、0.65%，平均值 0.68%，达到并优于预期目标(0.71%)。

5.3. 负面影响验证

对设备安全、产品质量、运行稳定性进行专项验证：(1) 安全：未改动主机结构，无机械干涉与安全隐患；(2) 质量：未产生新缺陷，包装外观、物理指标均达标；(3) 运行：高速稳定，无卡纸，停机率无上升，设备效率略有提升。

验证结论：改造安全可靠，无负面效应，满足工业化长期运行要求。

6. 应用效果与效益分析

6.1. 质量效果

2025 年 9~11 月对 D4#机组连续跟踪统计，与改造前使用同一厂家同一批次辅料，机器速度与操作人员保持一致，得到改造前后质量指标对比如表 5。

Table 5. Comparison of quality indicators before and after the renovation
表 5. 改造前后质量指标对比

指标	改造前	改造后	下降幅度
内框纸对中裁切缺陷率/%	0.71	0.047	93.4%
整机废品率/%	1.37	0.68	50.4%

结果表明：改造后质量指标显著优于目标值，包装质量稳定性大幅提升，缺陷控制效果突出。

6.2. 经济效益

改造总投入：弹片加工 + 辅料费用合计 0.24 万元。月均减少废品：59,400 包；单位生产成本：1.80 元/包(由工厂提供相关数据计算得出)；年节约成本： $59,400 \times 1.80 \times 12 - 0.24 = 128.064$ 万元。

6.3. 社会效益与推广价值

降低原辅材料消耗，减少纸制品浪费，绿色低碳效益明显；提升产品均质化水平与外观一致性，增强品牌竞争力；形成标准化图纸、作业规范与点检保养标准，纳入车间设备管理体系；已在 D3#、D4#两

台 2000Y 细支机组推广, 可覆盖 90 mm、100 mm 全系列细支烟高速包装设备, 具备行业推广价值。

7. 结论

通过生产数据统计与缺陷溯源分析, 证实内框纸对中裁切缺陷是 2000Y 包装机生产红塔山(细支传奇)高废品率的主要原因, 缺陷率 0.71%, 占总废品 51.8%, 严重影响质量、成本与效率。经六维度因子解析与现场量化验证, 确定压辊轮压紧力不足导致内框纸高速输送抖动是造成定位裁切缺陷的唯一主要原因, 揭示了高速输送下纸张抖动与定位偏差的内在机理。

设计一种基于 38CrMoAl 渗氮钢的内框纸弹性压紧弹片机构, 通过双因素交互试验确定最优结构组合, 实现内框纸输送抖动抑制与定位精度提升, 结构简单、可靠性高、成本低。工业应用表明: 内框纸缺陷率降至 0.047%, 整机废品率降至 0.68%, 年经济效益超 128 万元; 改造无需改动主机、安装便捷、运行稳定可靠, 无安全与质量风险。研究成果已形成标准化图纸与作业规范, 可在同类型高速细支烟包装设备上推广应用, 为卷烟包装质量提升、降本增效与高质量发展提供工程参考与技术支撑。

参考文献

- [1] 吴国瑞, 张强, 吕红珍. YB25 包装机封签纸自动加料装置设计[J]. 科技创新与应用, 2025, 15(36): 120-123.
- [2] 王会泽, 鲁忠孝, 李学力, 等. YB511 包装机小盒透明纸成型装置改进方案设计[J]. 上海包装, 2025(12): 22-24.
- [3] 石信语, 陈永光. YB55 透明纸包装机视觉检测系统的设计[J]. 自动化应用, 2025, 66(23): 182-184.
- [4] 杨利, 石升威, 张健. ZB45 型包装机小盒修复装置的研制与应用[J]. 设备管理与维修, 2025(23): 22-24.
- [5] 汪良, 欧阳周, 王恒升, 等. 基于 ADRC 的放卷张力串级控制设计[J]. 控制与决策, 2025, 40(9): 2672-2680.
- [6] 施琦, 张涛, 褚云波, 等. ZB45 型硬盒包装机负压吸风对内衬纸输送过程的影响及调控技术研究[J]. 机械工程技术, 2022, 11(4): 410-417.
- [7] 李慧, 刘方, 张林岗, 等. 基于 HMM 的烟草包装机内衬纸输送位置纠偏方法[J]. 机械与电子, 2022, 40(6): 31-35.
- [8] 李飞鸿, 李南希, 代元平. 一种新型传感器支架的设计与应用[J]. 仪器与设备, 2025, 13(4): 608-618.