

ZJ116卷烟机刺破烟成因及改进研究

乔彬, 王立治, 黄长斌, 吕道勇, 苟世祥

红塔烟草(集团)有限责任公司昭通卷烟厂卷包车间, 云南 昭通

收稿日期: 2025年9月10日; 录用日期: 2025年9月30日; 发布日期: 2025年10月13日

摘要

PROTOS系列卷烟机作为国内烟草生产的核心装备, 其中ZJ116机型作为国内应用最为广泛的高速机型, 在生产过程中暴露出很多问题, 其中烟支外观缺陷是该卷烟机的主要缺陷产品, 而刺破烟是外观质量缺陷中主要缺陷种类, 严重影响了产品质量的稳定性。本文通过对卷烟生产流程中各个工艺流程点进行分析, 结合生产中的实践数据, 从烟机设备生产过程中涉及到的力学表现分析, 剖析了烟丝束成形、水松纸搭接与搓接等关键工序中产生刺破烟的原因, 明确了其中烟梗不受控、机械挤压应力集中两大核心诱因。针对查找出来刺破烟产生的核心因素, 创新性地设计了入口梳导式镜面导轨、释压切纸鼓轮、“E型”减压起始轨等改进方案。通过现场试验验证, 改进后的刺破烟发生率降低72.3%, 为烟草装备精细化升级与降本增效提供理论依据和技术支撑。

关键词

ZJ116卷烟机, 刺破烟, 多学科分析, 接触力学, 设备优化

Research on Causes and Improvements of Cigarette Puncturing in ZJ116 Cigarette Making Machine

Bin Qiao, Lizhi Wang, Changbin Huang, Daoyong Lyu, Shixiang Gou

Cigarette Rolling and Packaging Workshop, Zhaotong Cigarette Factory, Hongta Tobacco (Group) Co., LTD., Zhaotong Yunnan

Received: September 10, 2025; accepted: September 30, 2025; published: October 13, 2025

Abstract

As the core equipment for domestic tobacco production, the PROTOS series cigarette making machines, with the ZJ116 model being the most widely used high-speed type in China, have revealed multiple issues during production. Among these, cigarette appearance defects account for the majority

文章引用: 乔彬, 王立治, 黄长斌, 吕道勇, 苟世祥. ZJ116 卷烟机刺破烟成因及改进研究[J]. 动力系统与控制, 2025, 14(4): 412-419. DOI: 10.12677/dsc.2025.144041

of defective products generated by this machine, and cigarette puncturing is the primary type of appearance quality defect, which severely undermines the stability of product quality. By analyzing each process node in the cigarette production flow and integrating practical production data, this paper examines the causes of cigarette puncturing in key processes (including cut tobacco bundle forming, tipping paper lapping and twisting) based on an analysis of the mechanical behaviors involved in the operation of cigarette making equipment. It identifies two core inducing factors: uncontrolled tobacco stems and concentrated mechanical extrusion stress. Targeting these identified core factors, innovative improvement schemes are designed, such as an inlet comb-guided mirror guide rail, a pressure-relief paper cutting drum, and an “E-shaped” pressure-reducing initial rail. Field test verification indicates that the incidence of cigarette puncturing has decreased by 72.3% after the improvements, providing a theoretical basis and technical support for the refined upgrading of tobacco equipment, as well as cost reduction and efficiency enhancement.

Keywords

ZJ116 Cigarette Making Machine, Cigarette Puncturing, Multidisciplinary Analysis, Contact Mechanics, Equipment Optimization

Copyright © 2025 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

随着烟草行业高质量发展战略深入推进,“优质、高效、低耗”成为卷烟生产企业的核心竞争力。某卷烟厂生产数据显示,ZJ116 卷烟机组的单箱卷烟纸消耗量高于行业平均水平 8.2%,经修理工检查分析发现,ZJ116 卷接机烟支外观缺陷率高是导致消耗高的根本原因。其中的刺破烟占外观缺陷总量的 61.5%,因刺破烟剔除导致的卷烟纸浪费占总损耗的 45.3%。

烟梗作为刺破烟的核心诱因,它在烟丝流形成过程中的运动状态、与供料成形机关键部件的接触受力特性,受到了机械工程力学、空气动力学等一些因素的综合影响。行业内对卷烟机设备对烟支外观质量方面的影响已经开展了大量的研究:HAUNI 公司在 PROTOS-M5 机型中通过吸丝带气流场分布的优化应用来降低烟梗紊乱率,但并没有针对机械挤压应力集中的问题提出解决方案[1];王健等(2022)通过调整流化床内风力系统参数来调整烟梗的定向率,但并未结合设备结构进行改造进而实现长期稳定的控制[2];李刚等(2020)针对 ZJ119 机型搓接机构进行了优化,减少了刺破烟的产生,但方案不适用于 ZJ116 机型的结构特性[3]。

本文以 ZJ116 卷烟机生产工艺流程为主要思路,结合烟支成形过程中所受到的多种力揭示刺破烟形成的本质,提出兼具科学性与实用性的改进方案,旨在从卷制成形过程中解决刺破烟问题,助力企业实现质量与效益双提升。相较于行业中已进行的研究分析,本研究的独特贡献在于:一是将接触力学、流体力学与设备结构设计进行深度结合,来分析烟支在卷制成形过程中产生刺破的本质;二是创新设计多部件协同改善的改进方案,解决烟梗不受控、机械挤压应力集中两大核心问题;三是通过正交试验确定改造部件关键参数的最优组合,确保方案的稳定性。

2. 刺破烟产生机理的分析

2.1. 烟丝束成形阶段:气流场扰动与流向变化

刺破烟产生的源头环节是烟丝束成形阶段。流化床与负压吸丝腔组成了将烟丝松散并形成烟丝束的

重要部件, 烟丝和烟梗在正压吹风与负压吸气的双重作用下按既定路径运动至吸丝带底部, 而此路径中烟丝和烟梗的运动状态是不可控的, 空气力学与流体力学特性的失衡直接导致烟梗定向紊乱。

从空气力学角度来看, 负压吸风形成的非均匀流场是烟梗在烟丝束成形过程中运动状态不可控的核心驱动力。烟丝的密度一般为密度 $0.12 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$, 烟梗的密度一般为 $0.45 \pm 0.03 \text{ g/cm}^3$ (数据来源:《烟草及烟草制品密度测定气体置换法》[4]), 因为两者之间存在密度差异, 在运动过程中就产生了显著的空气阻力差。根据斯托克斯定律, 烟梗因形状不规则导致迎风面积动态变化, 在气流中同时受到非定常阻力与升力, 形成绕流涡旋。烟梗在进入风室体前的流动空气中会处于翻滚运动状态, 大约 68% 的刺破烟都是该阶段中的烟梗在烟丝流中的横向或者斜向的分布。

从流体力学角度来看, 烟丝流从流化床中经正压吹风和负压吸风共同作用下上升到吸丝带的运动过程呈现了“悬浮 - 加速 - 吸附 - 横移”多阶段的流态变化, 其中流场的稳定性直接决定了烟梗的定向状态。流化床中的烟丝经过负压与正压双重作用下以高速垂直上升至吸丝带中, 这个时候烟梗和烟丝呈现不同运动特性: 烟丝呈均匀悬浮状态, 而烟梗因为受惯性力的影响容易形成局部的沉降, 因此导致烟丝流中烟梗的分布不均匀。当烟丝流到达吸丝带下方负压区时, 气流速度达到最大, 形成了“射流 - 汇流”耦合流场, 这个时候烟丝流的运动速度也最大。

烟丝到达吸丝带后被吸丝带阻挡, 停止垂直向上的运动被吸附到吸丝带表面, 随着吸丝带以 11.2 m/s 的速度横向移动。此时的烟梗容易受撞击而发生旋转, 形成与吸丝带运动方向垂直或倾斜的姿态, 为后续工序中卷烟纸被刺破埋下隐患。

2.2. 水松纸搭接阶段: 机械挤压与应力集中

在滤嘴烟组与水松纸的搭接工序中, 靠拢轮与水松纸鼓轮对烟组的机械挤压作用, 是烟支中烟梗刺破卷烟纸的直接性因素, 本质就是烟组的机械受力与材料特性的匹配失衡。

从机械工程力学角度来分析, ZJ116 卷烟机为了保证水松纸的搭接质量, 设置水松纸在水松纸切纸鼓轮与靠拢鼓轮处与烟组搭接, 搭接处两鼓轮间隙设置为烟支直径减 1.5 mm , 两鼓轮从整个烟组轴向上对其进行挤压, 该处对烟组的挤压过量。常规烟支直径为 7.7 mm , 两鼓轮搭接处就对烟组有 1.5 mm 的压缩量, 此时烟组承受的挤压应力达到 $0.8 \sim 1.2 \text{ MPa}$ (测量设备: Fluke Ti480 红外热像仪与 Kistler 9257B 压力传感器)。根据材料力学分析, 烟丝的可压缩性更强, 烟梗的硬度更高, 导致压缩的时候卷烟纸在与烟梗接触时形成应力集中。当局部应力超过卷烟纸断裂强度时, 就会发生刺破[5]。

2.3. 滤嘴烟支搓接阶段: 机械挤压

在水松纸搓接工序中, 搓板机构与搓烟轮的配合决定了烟组最终的成形质量, 该工序中产生刺破烟的核心问题在于起始轨与搓烟轮的机械挤压。

从结构力学角度来分析, 起始轨与靠拢轮之间的间隙为烟支直径减 0.7 mm , 起始轨的机械结构与作用使烟组产生强制位移, 在搓烟轮与搓板之间作纯滚动。起始轨的平面设计导致压力集中于起始轨与烟组接触的整个面积, 而烟组与起始轨接触的区域包含卷烟纸包裹的烟丝段, 这部分恰好是刺破烟产生的聚集部位。经过统计发现, 约 60% 的刺破发生在起始轨与烟组接触的烟支区域范围内。

3. 基于多学科理论的改进方案设计

3.1. 入口导梳式镜面导轨设计

3.1.1. 烟梗定向率定义与测量方法

定义: 烟梗定向率指烟丝束中烟梗轴线方向与吸丝带运动方向的夹角 $\leq 30^\circ$ 的烟梗数量占总烟梗数

量的百分比,是衡量烟梗运动状态可控性的核心指标。当定向率 $\geq 85\%$ 时,烟梗在后续工序中刺破卷烟纸的概率显著降低[6]。

测量方法:采用高速摄像法(高速相机型号: Phantom V2512, 帧率 1000 fps)结合图像分析软件进行测量。具体步骤如下:

- 1) 在流化床出口与吸丝带入口之间设置观测区域,确保视野覆盖烟丝束运动全范围;
- 2) 连续拍摄 3 组、每组 10 s 的烟丝束运动视频,提取视频中每帧图像的烟梗轮廓;
- 3) 通过软件自动识别烟梗轴线方向,计算与吸丝带运动方向的夹角;

4) 统计夹角 $\leq 15^\circ$ 的烟梗数量,代入公式“定向率 = (符合条件烟梗数量/总烟梗数量) $\times 100\%$ ”计算结果,取 3 组数据平均值作为最终定向率。

3.1.2. 入口导梳式镜面导轨创新性设计

基于接触力学与力矩平衡原理,创新性设计凸条-凹槽复合结构经抛光打磨处理的“镜面式”合金导轨,实现烟梗主动定向。导轨表面设置 1 条导流凸条,在凸条高度与宽度的选择上,进行了实验论证。其中导条高度小于 2 mm 无法起到梳理烟梗的作用,又由于安装位置受限,导条高度不得大于 3 mm。所以小组在尺寸范围内选择了 2.0 mm、2.5 mm、3.0 mm 进行实验。其中导条厚度大于 0.5 mm 会影响烟丝的进入量,导致烟支空头。厚度小于 0.3 mm 起不到梳理烟梗的作用,因此在尺寸范围内选择了 0.3 mm、0.4 mm、0.5 mm 三个水平进行实验。其中导轨长度烟丝导轨在长度方向上分为流化床导轨段和劈刀导轨段,所以导条在导轨上的安装位置有 3 种:劈刀导轨段、导轨全长和流化床导轨段。

如表 1,第 5 号实验的缺陷率为 0.25%,最低,烟梗定向率达 89.0%,为所有实验组最高。因此从直观上看,实验的最好条件为: A2B2C3。I 是指该因素位级 1 三次实验缺陷率之和,II、III 同理。缺陷率之和应该越低越好,定向率之和越高越好,因此从计算结果来看,实验的好条件为 A2B2C3。通过实验得知 A2B2C3 的实验结果均低于正交实验中的其他组合的实验结果。因此确定最佳的组合为:导条高度: 2.5 mm;导条厚度: 0.4 mm;安装位置: 安装于流化床位置段(如图 1 所示)。

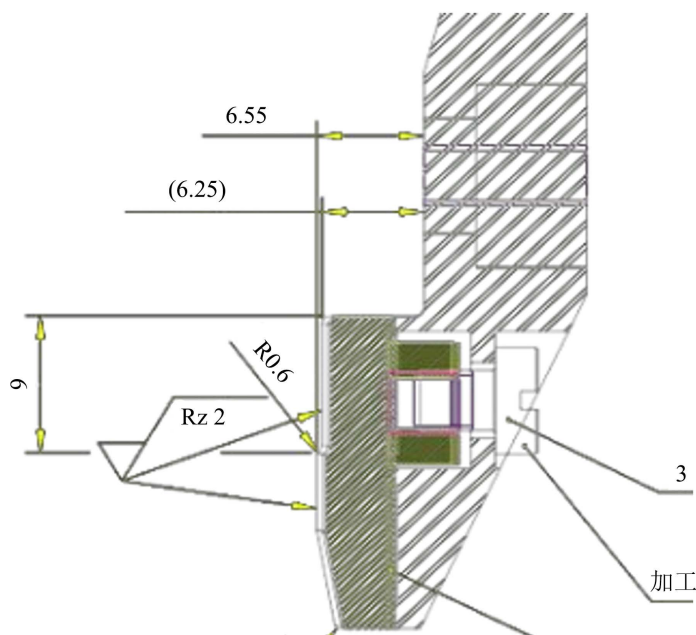


Figure 1. Drawing of the entrance comb-guide mirror guide rail

图 1. 入口梳导式镜面导轨图纸

Table 1. Experimental plan
表 1. 试验计划表

实验计划					实验结果
实验号	因素				刺破烟缺陷率(%)
	导条高度 A	导条厚度 B	导条安装位置 C	D	
1	2	3	空列		
1	1 (2.0 mm)	1 (0.3 mm)	3 (流化床导轨段)	2	0.29
2	1 (2.0 mm)	2 (0.4 mm)	1 (劈刀导轨段)	1	0.32
3	1 (2.0 mm)	3 (0.5 mm)	2 (导轨全长)	3	0.35
4	2 (2.5 mm)	1 (0.3 mm)	2 (导轨全长)	1	0.28
5	2 (2.5 mm)	2 (0.4 mm)	3 (流化床导轨段)	3	0.25
6	2 (2.5 mm)	3 (0.5 mm)	1 (劈刀导轨段)	2	0.33
7	3 (3.0 mm)	1 (0.3 mm)	1 (劈刀导轨段)	3	0.34
8	3 (3.0 mm)	2 (0.4 mm)	2 (导轨全长)	2	0.30
9	3 (3.0 mm)	3 (0.5 mm)	3 (流化床导轨段)	1	0.35
I	0.96	0.91	0.99	0.95	I + II + III = 2.81
II	0.86	0.87	0.93	0.92	
III	0.99	1.03	0.89	0.94	
极差 R	0.13	0.16	0.1	0.03	

在导轨表面等离子喷涂 WC-Co 涂层(厚度 50 μm), 硬度提升至 HV1200, 耐磨性提高 3 倍。同时, 烟丝束与导轨摩擦系数大幅度减小(由原 0.32 降至 0.15, 采用 MMW-1A 型摩擦磨损试验机测量), 烟梗定向率稳定维持在 89% [7]。

3.2. 释压切纸鼓轮设计

针对切纸轮和靠拢轮的压缩量, 设计一种减少刺破烟的靠拢轮。在接装纸粘接过程中, 切纸鼓轮与搓板存在挤压, 目的是通过挤压将带有胶水的接装纸片粘贴在烟组上, 用以完成下一步搓接。因此烟条就不可避免地受到了切纸鼓轮的挤压, 内部空间变小, 烟梗刺破卷烟纸形成刺破烟。ZJ116 卷烟机常规在用接装纸宽度为 64 mm, 为保障组烟搭接时稳定以及不影响吸风孔区域, 沿边缘孔开始进行开槽。因此, 不改动区域长度为 72 mm; 搭接位置在第一排孔后 1.5 mm (设备固定参数), 以此为开槽基准。因为切纸轮对烟支具有 1.5 mm 的压缩效果。根据理论推算得知, 切纸轮与烟支接触面水平宽度为 4 mm, 以此作为开槽宽度, 但考虑到槽内积灰难以清洁, 决定靠近棱边一侧完全铣削。开槽深度 1.5 mm (如图 2 所示)。对开槽进行抛光、倒角处理。

该设计通过并在非搭接区域铣削 1.5 mm 深的槽体, 改变了切纸轮与烟支的接触界面形态, 不改动的 72 mm 区域保留了原有结构保证水松纸搭接时的压缩力。而改动部分的 1.5 mm 深的槽使烟组中的烟丝部分不受挤压, 避免烟条内部因过度压缩导致的体积骤减与应力积聚, 烟条主体所受的挤压正应力从均布载荷变为非均布载荷, 有效降低了烟梗因受压产生的横向剪切力, 减少其刺破卷烟纸的动力源。

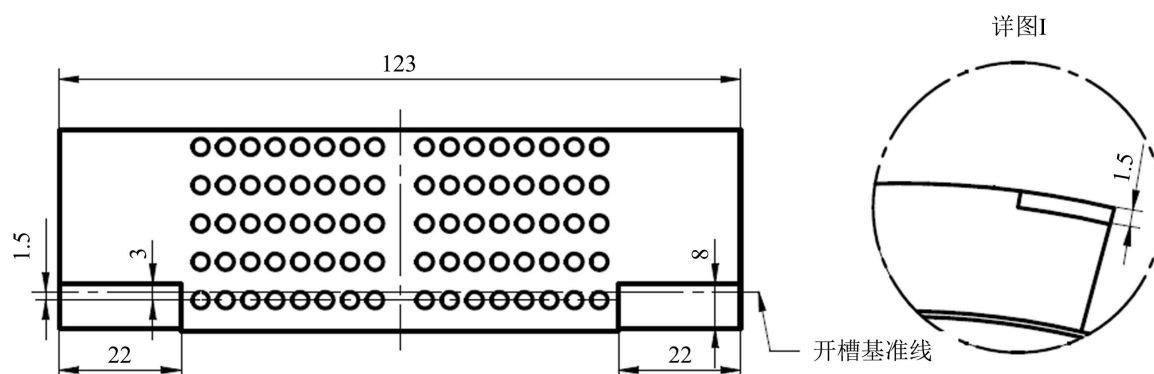


Figure 2. Design drawing of pressure relief paper cutting drum
图 2. 释压切纸鼓轮设计图纸

3.3. “E 型”减压起始轨设计

设计“E”型起始轨需要在起始轨两端保留一部分作为支撑,然后将起始轨与烟条段接触的部分进行铣削。通过分析烟丝密度曲线,发现在烟条段 42 mm 往后,烟丝密度逐渐上升。由支撑能力公式 $W = \rho \times L \times S$ (其中 W 为支撑能力,单位 kg; ρ 为烟丝密度,单位 kg/m^3 ; S 为接触面积,单位 m^2 ; L 为接触长度,单位 m) 得知:烟丝密度越高,支撑能力越好[8]。因此选择烟条段 42 mm 处往后作为必要支撑段。

烟条段 42 mm 位置对应起始轨上位置为两端 10 mm。两端保留与烟条段接触 10 mm,同时保留起始轨原生的边缘 4 mm 倒角,防止对烟支产生压痕。接装纸的宽度为 64 mm,为保证接装纸的搓接过程顺利,避免外观缺陷烟支的产生,需要在接装纸两边各保留 4 mm 的余量。两边各保留 10 mm 作为必要支撑,接装纸两端各保留 4 mm;剩下与烟条段接触的 30 mm 为非必要压缩,可以铣削。由于 ZJ116 机型起始轨对烟支压缩量为 0.7 mm,烟支直径为 7.7 mm,因此采用 0.7 mm 的铣削深度可以使铣削后起始轨对于烟条段压缩量减小至 0 (如图 3 所示)。

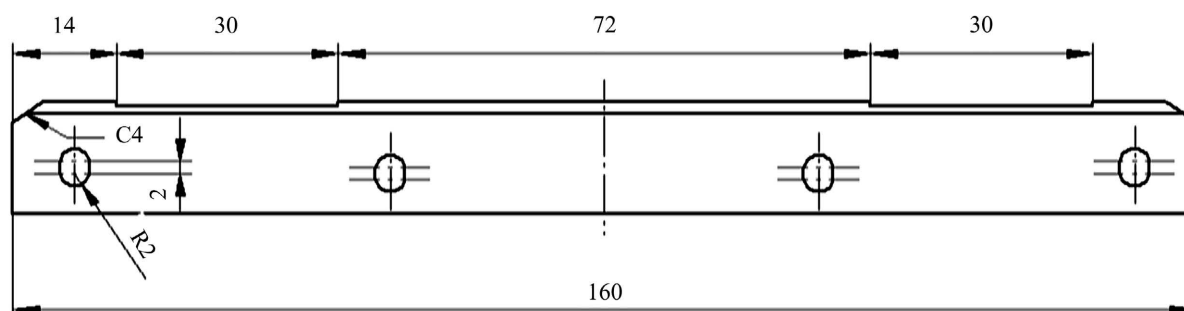


Figure 3. “E-type” starting track drawing
图 3. “E 型”起始轨图纸

4. 改进方案的试验验证与效果分析

4.1. 试验条件与方法

选取“红塔山(1956)”烟支(直径 7.7 mm, 长度 84 mm)为试验样品,选 3 组设备进行对比试验: 1) 对照组: 采用原设备结构,无任何改进; 2) 单项目改进组: 只改造入口导梳式镜面导轨; 3) 综合改进组: 应用改造本文提出的 3 项改进方案。每组机台连续性生产 50 万支烟,通过在线视觉检测系统采集各组产生刺破烟的数据,同时记录烟支圆周度等物理指标。

4.2. 试验结果与分析

试验数据如表 2 所示，刺破烟的数量综合改进组较对照组降低 72.3%。通过试验数据来看，改进的方案有效地降低了刺破烟发生的频率，提升了烟支质量。

Table 2. Comparison of the incidence of puncture smoke in each group
表 2. 各组刺破烟发生率对比表

各组刺破烟发生比例表		
试验组	生产数量	刺破烟数量
对照组	500,000	187
单项目改进组	500,000	73
综合改进组	500,000	52

同时，各组烟支物理指标检测结果显示：对照组烟支圆周为 $24.20 \pm 0.2 \text{ mm}$ ；单项目改进组和综合改进组圆周与对照组对比之下数据没有显著差异，表明了改进方案对烟支核心物理指标并没有负面影响。

5. 结论与讨论

5.1. 结论

本文以 ZJ116 卷烟机生产工艺流程为主要思路，结合烟支成形过程中所受到的多种力揭示刺破烟形成的本质，基于所发现的问题结症，提出的入口导梳式镜面导轨、释压切纸鼓轮、“E 型”减压起始轨共同作用，从卷制成形过程中改善刺破烟形成的环境，实现了刺破烟缺陷的精准控制。现场试验表明，改进方案可以显著降低刺破烟的发生率，提升烟支质量稳定性与设备运行经济性。

5.2. 讨论

5.2.1. 方案的潜在普适性

ZJ116 型卷接机以及 ZJ119 型卷接机均属于常德烟草机械有限责任公司旗下产品，设备原理以及操作方式均存在较多相似之处。针对于本课题的三项成果“入口梳导式镜面导轨”“释压切纸鼓轮”“E 型”“减压起始轨”，均可以用于 ZJ119 型卷接机的改进中。其中 ZJ116 型卷接机以及 ZJ119 型卷接机在烟丝导轨上存在一定差异，但可沿用相同的设计方法设计改进导轨。

5.2.2. 新部件的经济性与耐用性

制造成本：入口导梳式镜面导轨单套制造成本约 76,148 元；释压切纸鼓轮单套成本约 67,200 元；“E 型”减压起始轨改造成本约 1600 元。综合来看，单台设备改造总成本约 144,948 元。以改造后物料消耗降低量 0.26 kg/箱，单位物料成本 107.95 元/kg，年产能 7 万箱计算，产生的年度经济效益约为 182 万元。

维护要求与耐用性：入口导梳式镜面导轨的 WC-Co 涂层耐磨性优异，正常运行下可延长维护周期，维护时仅需用酒精擦拭表面积灰，无需拆解；释压切纸鼓轮的开槽区域需每个月用压缩空气清理一次，防止烟末堆积影响压缩效果；“E 型”减压起始轨无特殊维护需求。

参考文献

- [1] Hauni Group (2021) PROTOS-M5 Cigarette Making Machine Technical Manual. Hauni Maschinenbau AG.
- [2] 王健, 李华, 张勇. ZJ118 卷烟机流化床风速参数优化研究[J]. 烟草科技, 2022, 55(6): 89-94.
- [3] 李刚, 赵亮, 刘军. ZJ119 卷烟机搓接机构改进与应用[J]. 机械设计与制造, 2020(11): 234-237.

-
- [4] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T21136-2007 烟草及烟草制品密度测定气体置换法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
 - [5] 刘杰, 周明, 吴涛. 卷烟机机械挤压应力检测与优化[J]. 烟草科技, 2019, 52(8): 78-83.
 - [6] 张宏, 王丽, 陈明. 高速卷烟机烟梗定向控制技术研究进展[J]. 轻工机械, 2021, 39(4): 105-110.
 - [7] 王强, 赵伟, 孙亮. 等离子喷涂 WC-Co 涂层在烟草机械部件中的应用[J]. 表面技术, 2020, 49(7): 289-295.
 - [8] 陈峰, 李娜, 张敏. 卷烟物理指标检测方法与控制[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018.