

滚花压接式水松纸拼接块的改良设计

徐 磊, 高运祥, 石筱倩

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: 2025年10月21日; 录用日期: 2025年11月27日; 发布日期: 2025年12月22日

摘要

为解决滚花压接式水松纸拼接装置在工作过程中, 经常出现接头断裂的情况, 本文对水松纸拼接失败的原因进行理论分析并找到症结所在, 通过仿真模拟实验, 最终对拼接块的花纹进行改良设计, 提高拼接可靠性, 运用效果良好。

关键词

水松纸, 滚花压接, 拼接块, 改良设计, 仿真模拟

Improved Design of Knurled Press-Fit Tipping Paper Splicing Block

Lei Xu, Yunxiang Gao, Xiaoqian Shi

Yuxi Cigarette Factory, Hongta Tobacco (Group) Co., Ltd., Yuxi Yunnan

Received: October 21, 2025; accepted: November 27, 2025; published: December 22, 2025

Abstract

To address the frequent joint breakage issues in knurled press-fit tipping paper splicing devices, this paper theoretically analyzes the causes of splicing failure and identifies the root cause. Through simulation experiments, the pattern design of the splicing block is improved, enhancing splicing reliability and demonstrating good application results.

Keywords

Tipping Paper, Knurled Pressing, Splicing Block, Improved Design, Simulation



1. 引言

在卷烟机的生产过程中，水松纸的连续供给对于保证生产效率至关重要。目前，多种超高速卷烟机采用滚花压接式水松纸拼接装置，但在实际生产中，水松纸接头在涂胶后经常发生断裂，导致设备效率下降。为解决这一问题，本文对水松纸拼接失败的原因进行理论分析，并通过对拼接块的花纹进行改良设计，提高拼接可靠性。

2. 理论分析

2.1. 接头受力分析

“滚花式机械压接”通过滚轮在纸片接头处施加压力，形成机械连接。拼接接头区域可分为中间区域、在用纸衔接线、备用纸衔接线。在机械滚花压接作用下，中间区域形成一个矩形的摩擦力凹凸啮合区域。

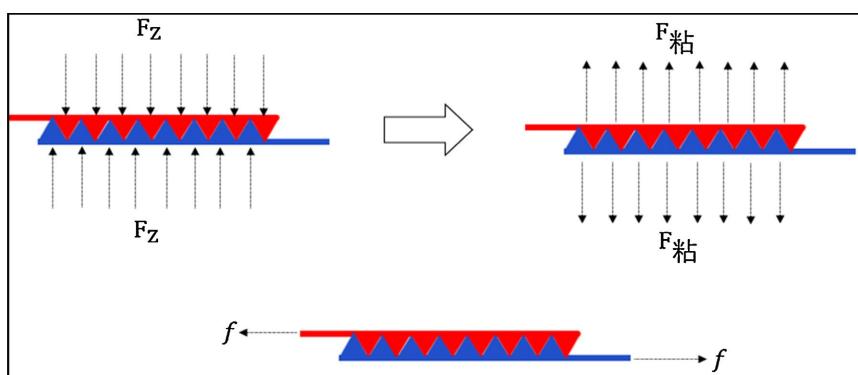


Figure 1. Force analysis diagram of the middle region

图 1. 中间区域受力分析图示

对于中间区域，在机械滚花压接的作用下，形成了一个矩形的摩擦力的凹凸啮合区域。拼接过程是一个复杂的力学模型，可将其近似等效于一个静摩擦力的力学模型，如图 1。在设备上，通常可以垫片的厚度来调节两压辊之间的间隙 Z ，在压接过程中两张接装纸受到了大小为 F_Z 的挤压力，使得两纸张滚花变形粘合，获得一个大小为 $F_{\text{粘}}$ 的粘合力，同时在滚花的作用下表面获得大小为 μ 的摩擦系数。此外，在用纸衔接线、备用纸衔接线处会形成一排微小的“孔洞”，这些“孔洞”会对该截面的抗拉能力带来削弱，其中孔洞的大小与滚压的压力、滚花的结构、接装纸的材料等都有相关性，用 $F_{\text{削}}$ 表示[1]。

如图 2，若通过减小垫片的厚度来调减小两压辊之间的间隙 Z ，在中间区域挤压力 F_Z 会增大，使得粘合力 $F_{\text{粘}}$ 增大，摩擦系数 μ 升高，最终使得摩擦力 f 增大，即中间区域抗拉强度提升；但在衔接线处，该截面的抗拉能力 $F_{\text{削}}$ 带来进一步的削弱，即衔接线处抗拉强度降低[2]。

2.2. 接头上胶影响分析

机械滚花压接后的纸片遇水更容易断裂，主要是因为滚花过程中造成的纤维重排和应力集中，以及吸水后纤维的膨胀、氢键的减弱和水分分布的不均匀性。这些因素共同作用，使得纸片在吸水后变得更

为脆弱，容易在拉伸时断裂[3] [4]。

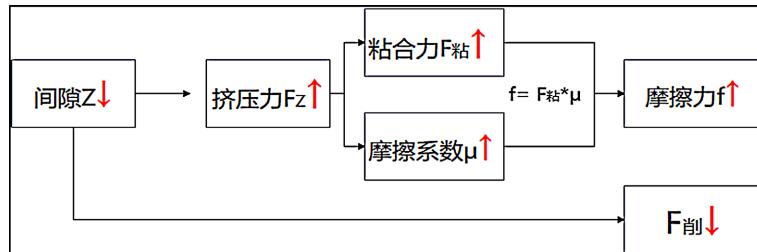


Figure 2. The effect of gap Z on the stress of the joint

图 2. 间隙 Z 对接头受力影响

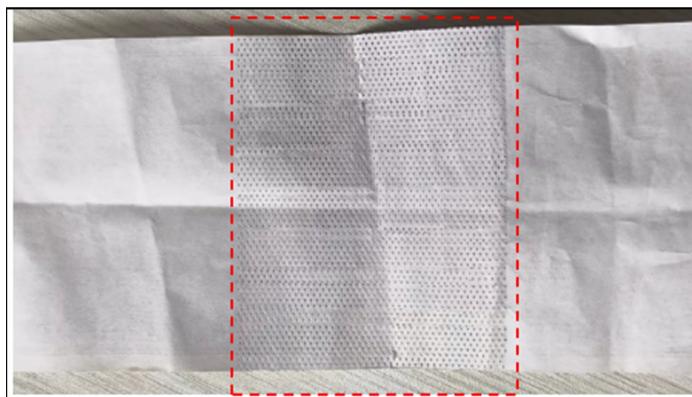


Figure 3. Splicing joint for splicing paper

图 3. 接装纸拼接接头

如图 3 所示，当纸片经过机械滚花压接后，其表面会形成特定的压花图案或纹理，这些图案或纹理会对纸片的物理性能产生影响。在滚花压接过程中，机械力会作用在纸片上，导致纤维发生重排，这意味着原本排列紧密的纤维可能会被重新排列，形成新的结构，由于局部区域的强烈压缩，会造成应力集中，这些区域在吸水时更容易受到水分的影响，因为水分会优先进入这些已经受到应力集中的区域，导致纤维进一步膨胀和分离。另外，由于滚花压接增加了纸片的表面积，使得更多的水分能够接触到纸片，这导致水分更快地被吸收到纸片中，对于已经受到应力集中的区域，这种膨胀会导致纤维之间的连接更加松动，从而降低了纸片的整体强度，增加了断裂的风险，这也就解释了为什么水松纸接头的断裂绝大部分都发生在上胶以后[3] [4]。

2.3. 接头上胶状态分布与风险概率

拼接后的接装纸经过上胶装置，形成不同上胶状态。设滚花接头区域宽度，周期，全胶区，半胶区。

拼接后的接装纸，经过一系列导纸辊，到达上胶装置处进行同步上胶，经过上胶后的接装纸在表面形成一定厚度的胶膜，由于该设备目前生产的品牌所采用的接装纸为预打孔，上胶为半胶方式，因此在纸上形成的胶膜为等间距窗口式。

当衔接线处于半胶区域时，无胶横截面长度为： $L1 = 12 + 8 + 8 + 12 = 40 \text{ mm}$ ；上胶横截面长度为：

$$L2 = 64 - 40 = 24 \text{ mm} ;$$

当衔接线处于全胶区域时，无胶横截面长度为： $L3 = 1 + 1 = 2 \text{ mm}$ ；上胶横截面长度为：

$$L4 = 64 - 2 = 62 \text{ mm} .$$

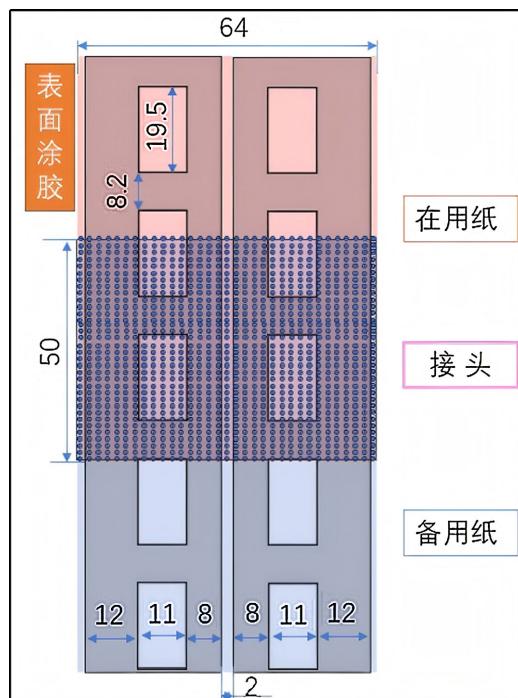


Figure 4. Illustration of the adhesive application on the tipping paper of a certain brand of cigarette
图 4. 某牌号烟支水松纸上胶图示

如图 4 所示为某品牌在用接装纸，即总宽度为 64 mm 的接装纸，当衔接线处于半胶区域时无胶横截面长度为 40 mm，上胶横截面长度为 24 mm；当衔接线处于全胶区域时，无胶横截面长度为 2 mm，上胶横截面长度为 62 mm。

接装纸上胶会对截面的抗拉强度进行削弱，则当衔接线处于半胶区域时被削弱占比为：

$$S1 = 40/64 = 62.5\% ;$$

当衔接线处于全胶区域时被削弱占比为： $S2 = 62/64 = 96.9\% ;$

$$S2/S1 = 96.9\%/62.5\% = 1.55 ;$$

衔接线处于全胶区域的削弱量是处于半胶区域的削弱量的 1.55 倍，为此有必要将其各状态进行识别分析。为此，衔接线处于全胶区域时需要重点关注。

2.4. 风险概率计算

由于接装纸在线拼接装置与上胶装置无同步关系，经研究分析，在上胶后接头与胶区存在三种不同的状态。

第一种：备用纸侧接头处于全胶区域，在用纸侧接头处于半胶区域，在该种工况下，备用纸侧接头处涂胶量多，容易在备用纸侧衔接线处断裂。

第二种：备用纸侧接头处于半胶区域，在用纸侧接头处于全胶区域，在该种工况下，在用纸侧接头处涂胶量多，容易在用纸侧衔接线处断裂。

第三种：备用纸侧接头和在用纸侧接头均处于全胶区域，在该种工况下，两侧涂胶量都多，备用纸侧和在用纸侧衔接线处都容易发生段断裂。

第四种：备用纸侧接头和在用纸侧接头均处于半胶区域，在该种工况下，两侧涂胶量都多，备用纸侧和在用纸侧衔接线处都不容易发生段断裂。

对四种情况的分布概率进行统计：

虽然滚花接头与上胶装置没有同步关系，由于滚花接头区域的宽度是固定的，并且半胶区域的上胶呈周期性分布，因此滚花接头与上胶装置存在相对的概率区间分布，经测量其主要参数如下：

滚花接头区域宽度： $L = 50 \text{ mm}$ ；周期： $T = 27.7 \text{ mm}$ ；全胶区(Q)： $T_1 = 8.2 \text{ mm}$ ；半胶区(B)： $T_2 = 19.5 \text{ mm}$ ； $T = T_1 + T_2$ 。

(1) 从初始到一阶段(图 5)

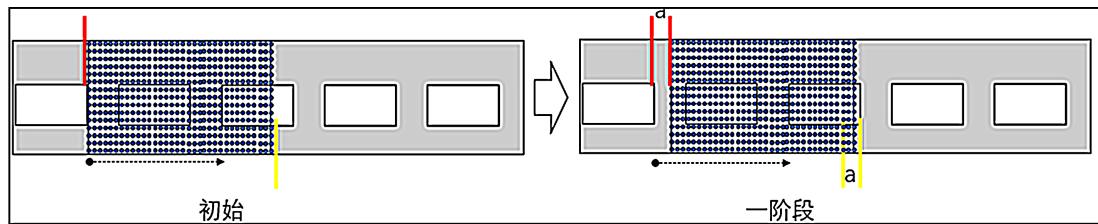


Figure 5. QB status

图 5. QB 状态

在该状态下，衔接处备用纸处于全胶(Q)，在用纸处于半胶(B)，可得：

$$Q_{(\text{备}1)} = \frac{2T - L}{T} = \frac{2 \times 27.7 - 50}{27.7} = 19.5\%$$

同理： $B_{(\text{在}1)} = 19.5\%$ 。

即此状态发生的概率为 19.5%。

(2) 从一阶段到二阶段(图 6)

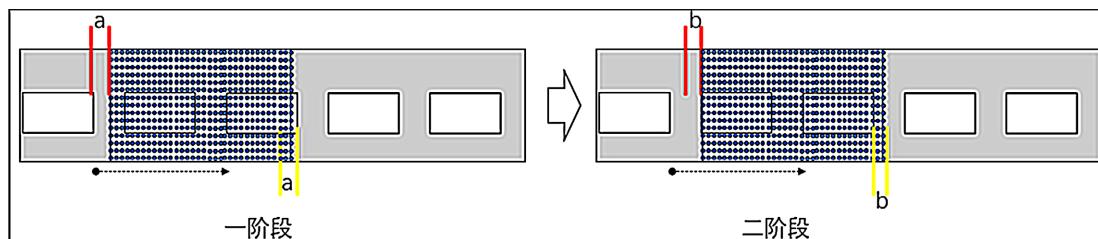


Figure 6. QQ status

图 6. QQ 状态

在该状态下，衔接处备用纸处于全胶(Q)，在用纸处于全胶(Q)，可得：

$$Q_{(\text{备}2)} = \frac{T_1 - (2T - L)}{T} = \frac{8.2 - (2 \times 27.7 - 50)}{27.7} = 10.1\%$$

同理： $Q_{(\text{在}2)} = 10.1\%$ 。

即此状态发生的概率为 10.1%。

(3) 从二阶段到三阶段(图 7)

在该状态下，衔接处备用纸处于半胶(B)，在用纸处于全胶(Q)，可得：

$$B_{(\text{备}3)} = \frac{T_1 - [T_1 - (2T - L)]}{T} = \frac{8.2 - [8.2 - (2 \times 27.7 - 50)]}{27.7} = 19.5\%$$

同理： $Q_{(\text{在}3)} = 19.5\%$ 。

即此状态发生的概率为 19.5%。

(4) 从三阶段到四阶段(图 8)

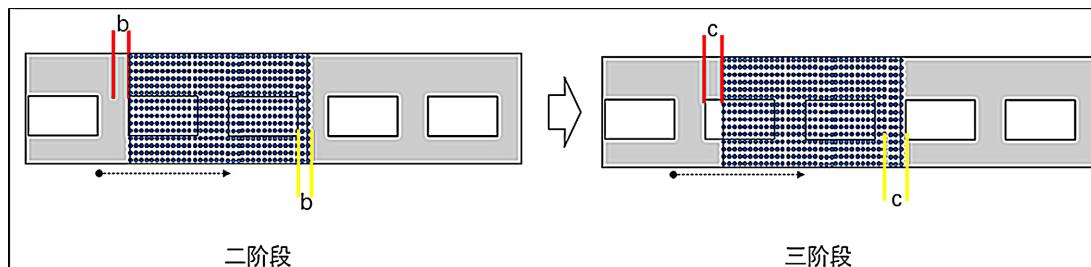


Figure 7. BQ state

图 7. BQ 状态

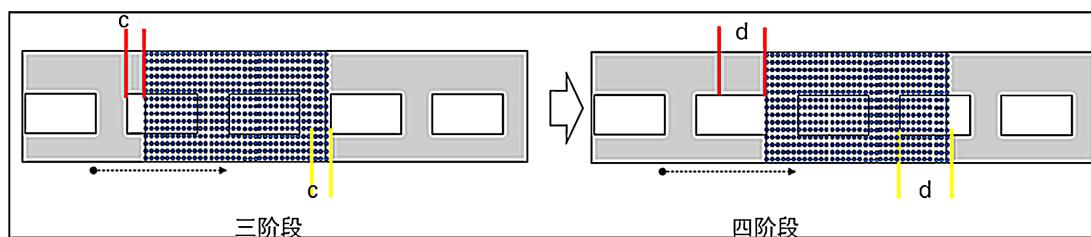


Figure 8. BB state

图 8. BB 状态

在该状态下，衔接处备用纸处于半胶(B)，在用纸处于全胶(B)，可得：

$$B_{(\text{备}4)} = \frac{T2 - \{T1 - [T1 - (2T - L)]\}}{T} = \frac{19.5 - \{8.2 - [8.2 - (2 \times 27.7 - 50)]\}}{27.7} = 50.9\%$$

同理： $B_{(\text{在}4)} = 50.9\%$ 。

即此状态发生的概率为 50.9%。

Table 1. Probability of glue application location
表 1. 上胶位置发生概率表

状态	备用纸	在用纸
从初始到一阶段	Q1	19.5%
从一阶段到二阶段	Q2	10.1%
从二阶段到三阶段	B3	19.5%
从三阶段到四阶段	B4	50.9%

上胶位置发生概率表如表 1，由此可得：

(1) 任意一侧在半胶区，另外一在全胶区。

通过比较分析，发现该类型为“从初始到一阶段”和“从一阶段到二阶段”，其概率为：

$19.5\% + 10.1\% = 29.6\%$ 。

(2) 两侧均在全胶区。

通过比较分析，发现该类型为“从二阶段到三阶段”，其概率为：19.5%。

(3) 两侧均在半胶区。

通过比较分析,发现该类型为“从三阶段到四阶段”,其概率为: 50.9%。

由于,衔接线处于全胶区域的削弱量是处于半胶区域的削弱量的 1.55 倍,可以将接头的断裂分为三个级别(表 2):

Table 2. Risk levels and probability table

表 2. 风险级别及概率表

级别	状态	概率
高风险	两侧均在全胶区	19.5%
中风险	任意一侧在半胶区, 另一侧在全胶区	29.6%
低风险	两侧均在半胶区	50.9%

2.5. 结论

- 1、不同 Z 值会造成不同的断裂风险;
- 2、上胶状态概率会造成不同的断裂风险。

3. 改良设计思路

- (1) 通过对垫片尺寸的调整,确定处 Z 的最佳值域;
- (2) 在 Z 的最佳值域内,改变滚花的长度,研究其对接头中间区域的影响情况,选出合适长度;
- (3) [5]根据国标 GB/T6403.3-2008 的几种滚花标准,研究滚花形式对接头中间区域及衔接处的影响情况,优选出合适的滚花形式;
- (4) [6]针对选出的滚花形式,对其结构进行改进,研究其对接头中间区域及衔接处的影响情况。

4. 仿真分析

4.1. 滚花形式分析



Figure 9. Knurled structure mapping

图 9. 滚花结构测绘

如图 9 所示,对现用的拼接块滚花结构形式进行测绘,其拼接宽度为 50, 滚花点数量为 $45 * 40$ [5]。根据 B/T6403.3-2008 中国滚花标准,该滚花结构属于其中的: 模数: $m = 0.4$; 高度: $h = 0.264$; 圆弧角: $r = 0.12$; 节距: $P = 0.1257$ 。

滚花表面形式经三维绘制后如下图 10 所示:

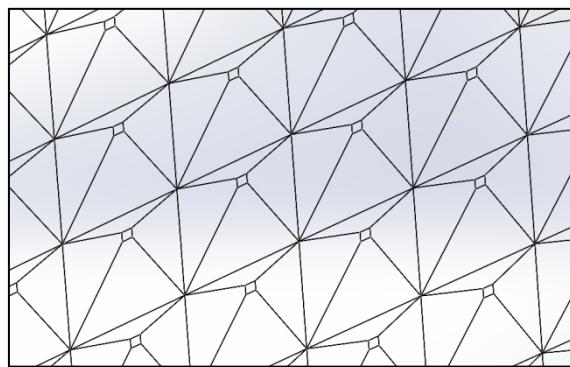


Figure 10. 3D rendering of knurled surface pattern
图 10. 三维绘制滚花表面形式

4.2. 确定出 Z 的最佳值域

Table 3. Relationship between z -value (overlap roller gap) and tensile force
表 3. z 值(搭接辊间隙)与拉力关系表

Z 值大小(mm)	Y1: 中间区域抗拉(N)	Y2: 衔接处抗拉力(N)
0.08	断裂	0.06f
0.11	0.76f	0.15f
0.14	0.94f	0.39f
0.17	0.79f	0.56f
0.20	0.62f	0.62f
0.23	0.38f	0.87f
0.26	脱开	1.03f

运用 Python 绘制相关性图:

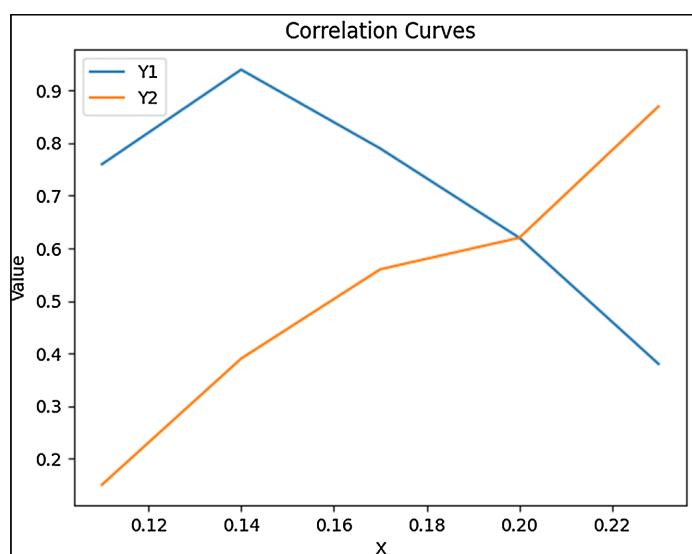


Figure 11. Relationship between Z value and tensile strength of the middle region $Y1$ and the junction $Y2$
图 11. Z 值与中间区域 $Y1$ 及衔接处 $Y2$ 抗拉关系

根据表 3 得出各参数间的相关性如下：

① Z 与 Y_1 之间的关系： $Z = -1.192 \cdot Y_1 + 1.350$ 这里的斜率为 -1.192 ，表明 Z 和 Y_1 之间存在负相关关系。

② Z 与 Y_2 之间的关系： $Z = 6.958 \cdot Y_2 - 0.665$ 这里的斜率为 6.958 ，表明 Z 和 Y_2 之间存在正相关关系。

③ Y_1 与 $2Y_2$ 之间的关系： $Y_1 = -4.500 \cdot Y_2 + 1.463$ 这里的斜率为 -4.500 ，表明 Y_1 和 Y_2 之间存在负相关关系。

结论：根据图 11 中所示，综合平衡考虑， Z 值在 0.18 mm 处较为合适。

4.3. 滚花的长度对接头中间区域的影响研究

Table 4. Relationship between knurling length and tensile force in the middle area

表 4. 滚花长度与中间区域拉力关系表

L 长度(mm)	Y_1 : 中间区域抗拉力(N)
40	$0.61f$
45	$0.666f$
50	$0.79f$
55	$0.82f$
60	$0.85f$

运用 Python 绘制相关性图：

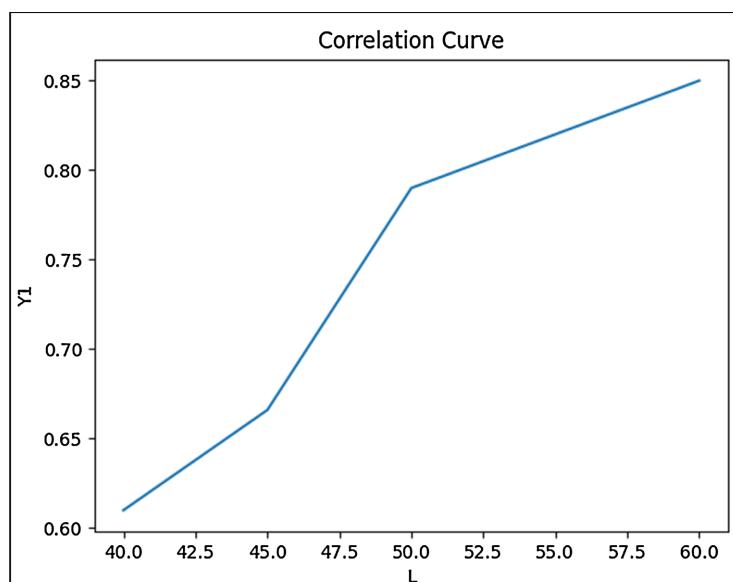


Figure 12. Relationship between length L and the tensile strength of the middle region Y_1

图 12. 长度 L 与中间区域 Y_1 抗拉关系

根据表 4 得出， L 与 Y_1 的相关性计算公式为： $Y_1 = 0.01126L + 0.112$ 。

根据图 12 中所示，将间隙调整为 0.18 mm ，通过改变接头长度的变化来分析中间区域抗拉力与长度呈正比例上升关系，在 50 mm 前上升斜率较大， 50 mm 之后升斜率放缓慢。由此可得，原有的 50 mm 宽度设计较为合理。

4.4. 滚花结构对接头中间区域及衔接处的影响情况

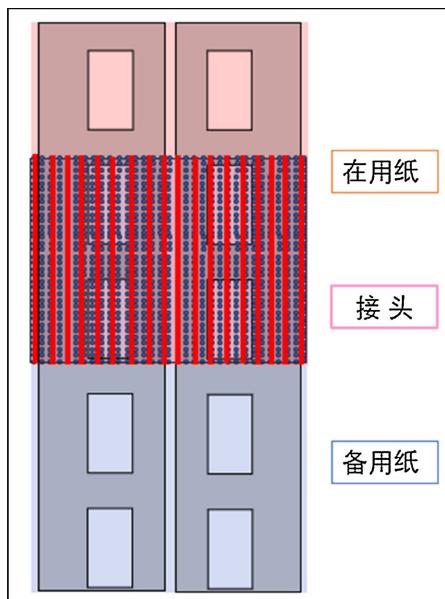


Figure 13. Knurled structure design diagram
图 13. 滚花结构设计图示

如图 13 所示, 对滚花结构的表面进行改造, 将滚花区域沿纵向开若干条槽, 槽宽 2 mm, 槽数为 6、7、8、9、10、11、12 条, 在间隙尺寸为 $Z=0.18$ mm, 拼接长度为 50 mm 的时候, 对不同的开槽条数进行受力模拟分析:

Table 5. Relationship between the number of slots and tensile force
表 5. 开槽条数与拉力关系表

X: 条数	Y1: 中间区域抗拉力	Y2: 衔接处区域抗拉力	备注
6	$0.77f$	$0.58f$	
8	$0.75f$	$0.71f$	纸尾不断
9	$0.72f$	$0.78f$	纸尾不断
10	$0.64f$	$0.83f$	纸尾不断
11	$0.48f$	$0.85f$	纸尾不断
12	$0.42f$	$0.89f$	纸尾不断

运用 Python 绘制相关性图。

根据表 5 得出各参数间的相关性如下:

- ① Y_1 与 X 的相关性计算公式为: $Y_1 = 0.03653 \cdot X + 0.24776$;
- ② Y_2 与 X 的相关性计算公式为: $Y_2 = 0.07541 \cdot X + 0.05959$;
- ③ Y_1 与 Y_2 的相关性计算公式为: $Y_2 = 0.77528 \cdot Y_1 + 0.24421$ 。

如图 14 所示, 从模拟实验结果来看, 当数量为 9 条时中间区域抗拉力与衔接处区域抗拉力相对平衡, 且总和最大。但是存在纸尾抗拉力也随之提高, 在拼接过程中纸尾切不断, 不能够满足需求。

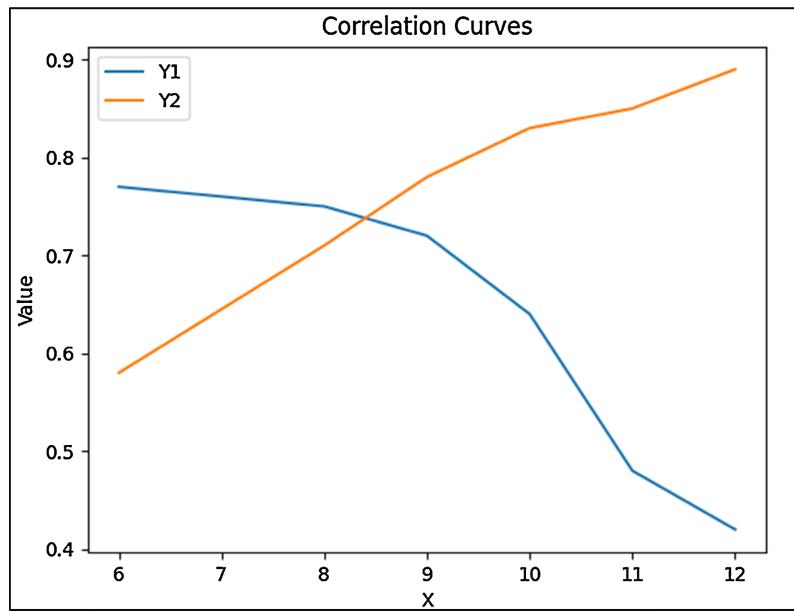


Figure 14. The force relationship between the number of slots X and corresponding values Y_1 and Y_2
图 14. 开槽条数 X 与 Y_1 、 Y_2 对应受力关系

4.5. 进一步对滚花结构进行优化

如图 15 所示, 对开槽滚花结构的表面再次进行设计改造, 将滚花区域开槽为交叉式, 这样就可以将单侧的槽数降为之前的一半, 若选用开槽条数为 9 条, 那么单侧的槽数仅为 4.5 条 < 6 条(纸尾能断), 接下来就需要确定每条槽交叉剩余尺寸, 实验将其分别设定 4 mm、6 mm、8 mm、10 mm、12 mm 进行实验, 实验时, 间隙尺寸为 $Z=0.18$ mm, 拼接长度为 50 mm, 开槽条数为 9 条, 对不同的交叉剩余尺寸进行受力模拟分析:

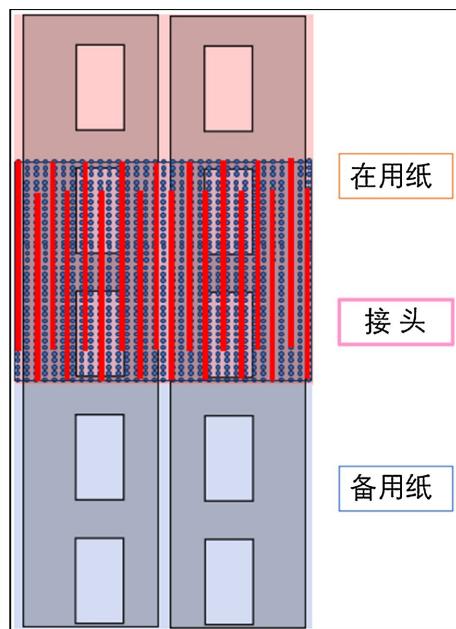


Figure 15. Design diagram of cross-knurled structure
图 15. 交叉式滚花结构设计图示

Table 6. Relationship between remaining dimensions of the cross and tensile force
表 6. 交叉剩余尺寸与拉力关系表

交叉剩余尺寸 J (mm)	中间区域抗拉力	衔接处区域抗拉力
2	$0.72f$	$0.78f$
4	$0.72f$	$0.78f$
6	$0.74f$	$0.73f$
8	$0.75f$	$0.71f$
10	$0.75f$	$0.68f$
12	$0.77f$	$0.64f$
14	$0.79f$	$0.55f$

运用 Python 绘制相关性图:

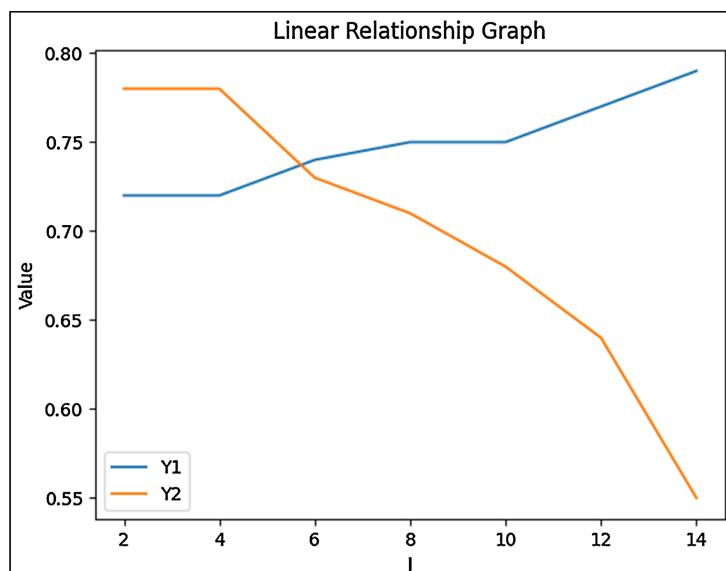


Figure 16. Force relationship between the remaining cross dimension J and corresponding values of Y_1 and Y_2
图 16. 交叉剩余尺寸 J 与 Y_1 、 Y_2 对应受力关系

根据表 6 得出各参数间的相关性如下:

- ① Y_1 与 J 的相关性计算公式为: $Y_1 = 0.000607J + 0.7$;
- ② Y_2 与 J 的相关性计算公式为: $Y_2 = -0.01821 \cdot J + 0.84143$;
- ③ Y_1 与 Y_2 的相关性计算公式为: $Y_2 = -3.17647 \cdot Y_1 + 3.07353$ 。

如图 16 所示, 从模拟实验结果来看, 当交叉剩余尺寸为 6 mm 时, 中间区域抗拉力与衔接处区域抗拉力相对平衡, 抗拉总和也最大, 抗拉值均大于 $0.75f$, 能够满足要求。

5. 设计与优化的确定

优化后:

- (1) 间隙尺寸为 $Z = 0.18$ mm;
- (2) 拼接长度为 50 mm;
- (3) 开槽条数为 9 条;

(4) 交叉剩余尺寸为 6 mm。

优化后的滚花结构如下图 17 所示:

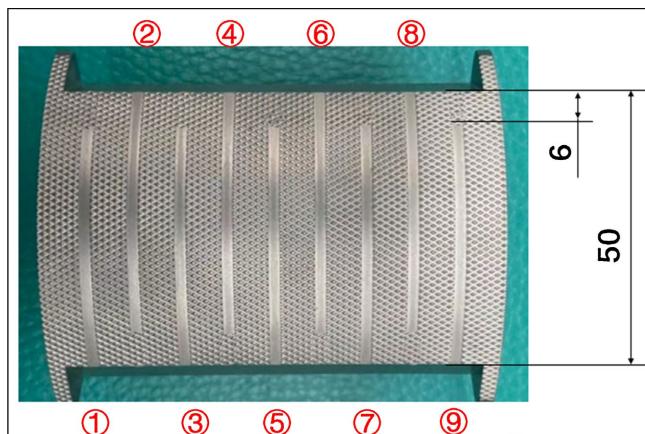


Figure 17. Optimized structure

图 17. 优化结构

6. 实验与验证

将优化后的滚花结构安装于某 ZJ119 机组，并连续一个月对其接装纸拼接的成功率进行统计，统计结果如下表 7:

Table 7. Statistics on the success rate of water-fed paper splicing

表 7. 水送纸拼接成功率统计表

总拼接次数 1083		拼接失败原因	
总成功次数	总失败次数	内部原因次数	外部原因次数
1044	39	26	13
占比: 96.40%	占比: 3.60%	占比: 66.70%	占比: 33.30%
成功率 = (总成功次数 + 外部原因次数)/总拼接次数 * 100% = 97.60%			

7. 结论

通过对水松纸搭接接块滚花花纹的改造设计，大大降低了之前搭接失败造成水松纸断纸与水松纸接头断裂或在输送过程中接头上胶后抗拉张力下降被扯开，裹紧胶缸造成停机的概率。水松纸拼接成功率得以提高，设备运行效率得以提升，因水松纸拼接故障而造成停机的情况大大减少。同时也提高了压接块面对不同厂商生产的水松纸时的泛用性，减少了更换使用不同辅料厂商的水松纸时的调试时间，提升了设备的利用率。

参考文献

- [1] 唐云歧. 机械基础[M]. 第 3 版. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2004.
- [2] 刘鸿文. 材料力学[M]. 第 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [3] 陈岱峰, 费婷. 水松纸表面特性及接装胶渗透性能研究用于卷烟生产制造质量控制[C]//中国烟草学会. 中国烟草 2013 年学术年会论文集. 上海: 上海卷烟厂工艺质量科, 2013: 386-396.

- [4] 王雷, 孙锐. 烟用接装纸上机适应性研究与分析[J]. 中国包装, 2025, 45(4): 24-27.
- [5] 中华人民共和国国家标准. 滚花(GB/T 6403.3-2008) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [6] 张世昌. 机械制造技术基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.