

## 制造技术

杨继, 尹志虹, 郭丽娟, 等. 卷烟接装纸粘唇强度建模及其应用研究[J]. 中国烟草学报, 2025, 31(3): 31-38. YANG Ji, YIN Zhijiang, GUO Lijuan, et al. Modeling of lip sticking degree of cigarette tipping paper and its application research[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2025, 31(3): 31-38. doi:10.16472/j.chinatobacco.2024.T0215

# 卷烟接装纸粘唇强度建模及其应用研究

杨继, 尹志虹, 郭丽娟, 张涛, 田然, 范多青, 叶灵,  
王浩, 唐石云, 李振杰, 杨玺\*

云南中烟工业有限责任公司技术中心, 昆明市北市区红锦路 367 号 650231

**摘要:**【目的】快速、简便、准确测定烟用接装纸对嘴唇的粘唇强度。【方法】选用剥离强度测试仪对不同牌号接装纸和人造嘴唇经过人工唾液粘合在一起的粘合力进行测量, 采用人工感官评吸和测定值进行对比。【结果】(1) 经对比优化筛选确定实验条件是: 选用医用硅胶作为人造嘴唇, 配制包含蛋白、酶等具有生物活性及无机盐的人工唾液, 接装纸和嘴唇的粘合长度为 10 mm, 粘合面积  $10 \times 15 = 150 \text{ mm}^2$ , 按照 50 mm/min 的拉伸速率, 人工唾液量为  $6 \mu\text{L}$ , 静置时间 1 min。(2) 模型表达为  $Y_{\text{粘唇强度}} = -1.36 \times 10^{-3} + 9.02 \times 10^{-3} * X_{\text{动态摩擦系数}}$ 。(3) 该方法和人工人工感官评吸一致, 模型准确可靠。

**关键词:** 接装纸; 粘唇强度; 剥离强度测试仪; 动态摩擦系数测定仪; 剥离力; 人造唇皮

烟用接装纸是通过对接装原纸进行印刷涂布及其他方式加工后得到的一种装潢纸, 常为软木色或不透明的白色, 主要有 3 方面的作用: 一是在高速卷接机上, 将滤嘴和烟棒接装在一起; 二是防止卷烟纸粘唇及不卫生问题; 三是改善烟支外观等。接装纸同吸烟者嘴唇直接接触, 部分老工艺的接装纸由于平滑度低、高吸水性和易渗透的特征, 在卷烟抽吸过程中, 容易吸收吸烟者嘴唇唾液因此黏附在嘴唇上。导致消费者吸食完后卷烟后不能将滤嘴顺利吐出, 甚至接装纸粘扯嘴唇出现撕破、出血的现象, 严重影响卷烟消费体验感。本研究所指的烟用接装纸粘唇力包括以上情形下接装纸对嘴唇的粘合作用力。

目前, 国内外卷烟滤嘴接装纸的研究热点多集中于接装纸中特定成分分析、接装纸毒理性及安全性评价、抗菌接装纸、接装纸中的元素分析、不同颜色接装纸的吸烟行为学等方面<sup>[1-6]</sup>。而烟用接装纸对嘴唇粘合力或粘唇程度的测定没有相关的研究, 涉及粘唇方面均是对接装纸的配方和工艺进行改进, 并没有涉及到具体检测方法的建立。例如“一种不粘嘴防止唇舌干燥的香味保健水松纸及其制备方法”中描述了水松

纸的工艺配方, 同时检测了原纸的纵向抗张强度和透气度, 没有提及粘唇力检测; “一种防粘唇防污染的过滤嘴”在接装纸外涂上一层保护膜, 没有对实际有益结果进行证明; “一种多功能水松纸”目的是防粘唇、赋香、阻燃等, 在水松纸外层复合水果香防水层和防护膜层, 但并未提及防粘唇的测试结果<sup>[7-9]</sup>。为准确评估不同工艺、不同类型接装纸对嘴唇皮肤的粘唇性能, 提升卷烟消费的整体舒适性, 亟需建立相应客观的分析测试方法。本研究提供一种能定量测定烟用接装纸对嘴唇粘合力的方法, 可以很好地避免传统借助人工感官评吸带来的主观因素影响和差异性表征, 客观、高效且重复性好、灵敏度高、操作简单, 可为行业物料准入、质量管控、升级产品提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料、试剂和仪器

样品: 不同工艺接装纸 (云南中烟工业有限责任公司); 医用硅橡胶膜 (英国舒乐, 性能技术指标见表 1); 聚氯乙烯膜 (上海源叶生物科技有限公司); 尿素 (大连美仑生物技术有限公司); 葡萄糖 (大连美仑生

基金项目: 云南中烟工业公司技术中心专项项目“卷烟接装纸粘唇力测定—动态摩擦法”(2024ZK01)

作者简介: 杨继 (1980—), 博士, 高级工程师, 主要从事烟草化学研究, Email: yangji052@163.com

通讯作者: 杨玺 (1976—), 硕士, 高级工程师, 主要从事卷烟装潢设计研究, Email: yxi@ynzy-tobacco.com

收稿日期: 2024-06-21; 网络出版日期: 2025-03-07

物技术有限公司);牛颌下腺唾液粘蛋白(大连美仑生物技术有限公司);淀粉酶(大连美仑生物技术有限公司);酸性磷酸酶;(大连美仑生物技术有限公司);溶菌酶(大连美仑生物技术有限公司);磷酸盐缓冲液(PBS)(分析纯,北京索莱宝有限公司);NaCl、 $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ 、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 、 $\text{KHCO}_3$ 、 $\text{MgCl}_2$ 、 $\text{CaCl}_2$ 、HCl、 $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ (分析纯,西陇化工股份有限公司)。

M250-2.5 CT 剥离强度测试仪(德国 KARL 公司);FP-2255 动态摩擦系数测试仪(美国 Thwing-Albert 公司);薄膜厚度仪(荷兰 Buchel 公司);电子天平(十万分之一 瑞士梅特勒-托利多公司)。

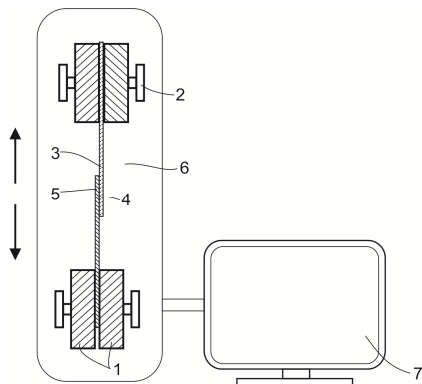
表 1 医用硅橡胶膜性能技术指标

Tab.1 Technical performance indicators of medical silicone rubber film

| 参数                            | 数值        |
|-------------------------------|-----------|
| 比重/( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) | 1.08±0.02 |
| 硬度/(邵氏 A)                     | 30±3      |
| 拉伸强度/MPa                      | ≥8        |
| 伸长率/%                         | ≥650      |
| 撕裂强度/( $\text{kN}/\text{m}$ ) | ≥25       |
| 线收缩率/%                        | 2.1±0.2   |

## 1.2 方法

模拟装置开发:为准确测定烟用接装纸和嘴唇的粘合力,首先要基于力值或位移的准确测定,测试的基本原理为:将接装纸和人造嘴唇通过人工唾液粘好,静置一定时间后将试样装夹在夹具的两个夹头之间,两夹头做相对运动,通过位于动夹头上的力值传感器和机器内置的位移传感器,采集到试验过程中的力值变化和位移变化,从而计算出试样的断裂力或剥离力<sup>[10-11]</sup>。此剥离力用于模拟烟用接装纸的粘唇力,如图 1 所示。



1. 夹具; 2. 夹头; 3. 烟用接装纸(印刷面粘合人造嘴唇); 4. 涂抹的人工唾液; 5. 人造嘴唇; 6. 传感器(力值传感器和位移传感器); 7. 力值/位移采集器。

图 1 剥离强度测试仪示意图

Fig.1 Schematic diagram of peel force tester

### 1.2.1 人工唾液配制

按照表 2 所示的物质及浓度,将每种物质换算为 1 L 所需的质量数,按对应质量数分别将 NaCl、KCl、 $\text{CaCl}_2$ 、 $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ 、 $\text{MgCl}_2$ 、尿素、葡萄糖、粘蛋白准确称取转移至 1 L 的容量瓶中,加入超纯水,混匀,再加入淀粉酶、酸性磷酸酶、溶菌酶,用盐酸调节 pH 至 7.0,加入超纯水至刻度。配制好以后放置在 0℃~8℃ 冷藏储存。

表 2 人工唾液配方一

Tab.2 Artificial saliva formula I

| 组成                        | 浓度/( $\text{mg}/\text{mL}$ ) | 组成    | 浓度/( $\text{mg}/\text{mL}$ ) |
|---------------------------|------------------------------|-------|------------------------------|
| NaCl                      | 1.4                          | 葡萄糖   | 0.2                          |
| KCl                       | 0.5                          | 粘蛋白   | 2.7                          |
| $\text{CaCl}_2$           | 0.1                          | 淀粉酶   | 2.5*                         |
| $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ | 0.15                         | 酸性磷酸酶 | 0.004*                       |
| $\text{MgCl}_2$           | 0.025                        | 溶菌酶   | 0.7*                         |
| 尿素                        | 0.09                         |       |                              |

注: \*单位为 units/mL。

Note: \* The unit is units/mL.

### 1.2.2 样品准备

烟用接装纸以专用接装原纸为基材,经过基膜涂布、镭射模压等不同工艺制备成高光接装纸、转移接装纸、口味接装纸、触感接装纸等新型品种<sup>[12]</sup>。按照行业标准 YC171—2014 准备不同工艺、不同牌号、不同类型的接装纸 20 份;宽度准确裁至宽度 15 mm,长度准确裁至 40 mm,编号分别是 1~20。选用医用硅橡胶膜代替人工嘴唇,准确裁至宽度 15 mm,长度准确裁至 40 mm。由于剥离强度测试仪进行上下两个夹具做相对运动上下间隔的最大距离为 40 mm,因此样品长度按 40 mm 准备。

### 1.2.3 测试分析

图 1 为测试仪器剥离强度测试仪的原理图。测试条件:将试样平整放置,印刷面朝上,用微量进样针准确移取 6  $\mu\text{L}$  人工唾液滴注在接装纸上,并用针管均匀将人工唾液刮涂在接装纸印刷面。将接装纸和人造嘴唇粘合在一起,粘合长度为 10 mm,粘合面积  $10 \times 15 = 150 \text{ mm}^2$ ,静置 1 min。利用剥离强度测试仪进行剥离测试,两个夹具夹子分别夹紧为未粘合的剩余部分,如图 1 所示,按照 50 mm/min 的拉伸速率,在接装纸和人造嘴唇分开瞬间采集到最大力模拟为粘唇力。

按照 GB/T 451.2—2002 “纸和纸板定量的测定”、

GB/T 451.3—2002 “纸和纸板厚度的测定”、GB10006—2021/ISO 8295:1995”薄膜和薄片 摩擦系数的测定”分别对 20 个样品进行定量、厚度和接装纸动摩擦系数测定，其中对摩擦系数的测定每个样品裁为 2 份，均测量纸与纸之间的摩擦系数。

将单位面积上的粘唇力定义为粘唇强度，按式(1)计算得出粘唇强度：

$$D = \frac{F}{S} \tag{1}$$

式中： $D$ ——接装纸的粘唇强度，单位为牛顿每平方毫米（N/mm<sup>2</sup>）； $F$ ——剥离强度测试仪测定的剥离力，单位为牛顿（N）； $S$ ——接装纸和嘴唇的粘合面积，单位为平方毫米（mm<sup>2</sup>）。取 3 次平行测定结果的平均值为最终测试结果，精确至 0.01 N/mm<sup>2</sup>，平行测定结果其相对平均偏差应小于 10%。

1.3 模型精度评价

评价预测模型精度用到的统计指标包括：绘制预测值与实测值的 1:1 线，直观检验模型模拟性能；预测值与实测值之间的均方根误差（RMSE）、归一化均方根误差(nRMSE)和决定系数( $R^2$ )。RMSE 和 nRMSE 反映预测值和实测值之间的绝对误差和相对误差，值越小表明预测效果越好； $R^2$  反映预测值和实测值之间的一致性，值越接近 1 表明预测值对实测值的解释率越高<sup>[13-14]</sup>。RMSE 和 nRMSE 的计算公式分别为（2）（3）：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2} \tag{2}$$

$$nRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}}{\bar{X}} \times 100\% \tag{3}$$

式中： $Y_i$  和  $X_i$  分别为模拟值和实测值； $\bar{X}$  为实测数据平均值； $n$  为样本容量。

2 结果与讨论

2.1 人工唾液配方

唾液主要由口腔各部黏膜中的唾液腺分泌，除水分外主要包含唾液淀粉酶、免疫球蛋白、溶菌酶、黏多糖、黏蛋白、尿素等有机物以及钾盐、钠盐和钙盐等无机物，其 pH 在 6.6~7.1<sup>[15]</sup>。受个体差异影响，唾液组成很不稳定，且收集和保存极为不便，因此实验中采用人工唾液代替真实唾液作为粘合媒介。目前，人工唾液大体分为两类，一类为无机盐溶液；另一类

为包含蛋白、酶等具有生物活性的物质以及无机盐的溶液。含生物活性物质的人工唾液<sup>[16]</sup>配方见表 2，两种无机盐溶液<sup>[17]</sup>配方见表 3、4。配方一中含有多种生物活性物质，是造成唾液蛋白残留在嘴唇上黏住接装纸的主要原因；配方二为无机盐溶液，简单易得，但和粘唇力关系不大。配方三中虽然和粘唇力关系较大，但由于尿素配比较高，有刺激性气味和实际情况不符。因此，为更好模拟消费者实际抽吸卷烟的过程，确定人工唾液按照配方一配制。

表 3 人工唾液配方二  
Tab.3 Artificial saliva formula II

| 组成                               | 浓度/（mmol/L） | 1 L 所需质量/g |
|----------------------------------|-------------|------------|
| NaCl                             | 10.00       | 0.5850     |
| Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> | 2.40        | 0.3408     |
| KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>  | 2.50        | 0.3400     |
| 柠檬酸                              | 0.15        | 0.0288     |
| KHCO <sub>3</sub>                | 15.00       | 1.5018     |
| MgCl <sub>2</sub>                | 1.50        | 0.1425     |
| CaCl <sub>2</sub>                | 1.50        | 0.1665     |
| 加超纯水 1L，用盐酸调节 pH 至 6.7           |             |            |

表 4 人工唾液配方三  
Tab.4 Artificial saliva formula III

| 组成                                                  | 用量      | 组成                                  | 用量          |
|-----------------------------------------------------|---------|-------------------------------------|-------------|
| KCl                                                 | 0.400 g | 尿素                                  | 1.000 g     |
| NaCl                                                | 0.400 g | Na <sub>2</sub> S·2H <sub>2</sub> O | 0.005 g     |
| CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O                | 0.795 g | NaOH                                | 调节 pH 至 6.9 |
| NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O | 0.780 g | 蒸馏水                                 | 加至 1000 mL  |

2.2 粘合面积

粘合面积直接决定粘唇力的大小，参考 YC171—2014 在接装纸裁剪宽度为 15 mm 的条件下，粘合面积由粘合长度直接决定，粘合长度是剥离强度测试仪能采集到的粘合力的最优长度。粘合太长易造成粘合力过大，剥离不开，实验数据波动大等问题；粘合太短可能采集不到剥离力。按照 50 mm/min 的拉伸速率，静置时间 1 min，人工唾液量为 6 μL，分别对市面上主要的原纸、高光、转移、触感、口味 5 种接装纸（1 号、6 号、8 号、11 号、19 号）进行试验。粘唇力随着粘合长度有所变化，4 种纸都是在 10 mm 的粘合长度下采集到的粘合力最大，11 号触感类接装纸则在 15 mm 和 20 mm 长度下仍呈上升趋势，可能跟纸的特性有关。超过 10 mm 的粘合长度由于粘合力较大，出现了接装纸剥离不开，或者粘合在一起被拉断的情形，

采集到的剥离力和真实的粘唇力不符,实验数据不稳定,没有普适性。结合实际抽吸过程,烟用接装纸不会和嘴唇接触太多,确定粘合长度为 10 mm,粘合面积为  $10 \times 15 = 150 \text{ mm}^2$ 。

### 2.3 人工唾液量

唾液量是决定烟用接装纸粘唇的关键因素,唾液量太少基本没有粘唇力,唾液量太多,接装纸容易被浸润。确定人造嘴唇和接装纸粘合面积,按照 50 mm/min 的拉伸速率,选取粘合静置时间 1 min,利用微量进样针分别取 2  $\mu\text{L}$ 、4  $\mu\text{L}$ 、6  $\mu\text{L}$ 、10  $\mu\text{L}$ 、20  $\mu\text{L}$ 、50  $\mu\text{L}$  的人工唾液,分别对上述的 5 个样品进行试验,结果如图 2 所示。粘唇力随着人工唾液的量有所变化,5 种接装纸在人工唾液用量为 6  $\mu\text{L}$  时粘合力达最大值,其中导致粘合力明显偏大。因此,确定试验人工唾液量为 6  $\mu\text{L}$ 。

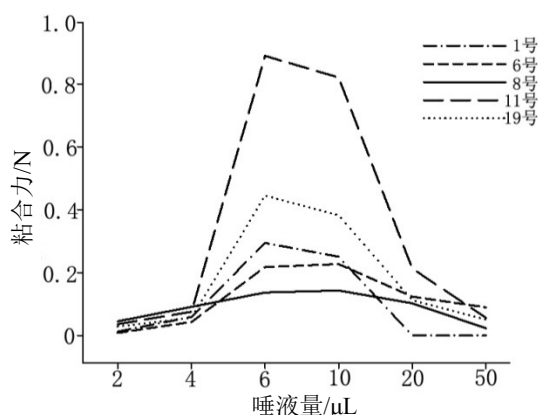


图 2 人工唾液体积优化  
Fig.2 Optimization of artificial saliva volume

### 2.4 静置时间

由于接装纸的印刷工艺不同,不同牌号接装纸对人工唾液的吸收渗透作用随着静置时间的变化而变化,因此导致粘唇力发生变化。在实验中发现 1 号接装纸随着静置时间的增加呈现粘合力先增加后减小的趋势。而 11 号接装纸由于吸水性很强,需要在制样完成后马上进行测试。分别对上述的 5 个样品进行试验,设定接装纸和嘴唇的粘合长度为 10 mm,粘合面积是  $10 \times 15 = 150 \text{ mm}^2$ ,按照 50 mm/min 的拉伸速率,人工唾液量为 6  $\mu\text{L}$ ,分别静置 10 s、30 s、1 min、2 min、3 min、5 min 进行试验,试验结果如图 3 所示。5 种材料均在静置时间为 1 min 时达最大粘合力,后由于人工唾液吸收或挥发原因,粘合力呈现下降趋势,确定静置时间为 1 min。

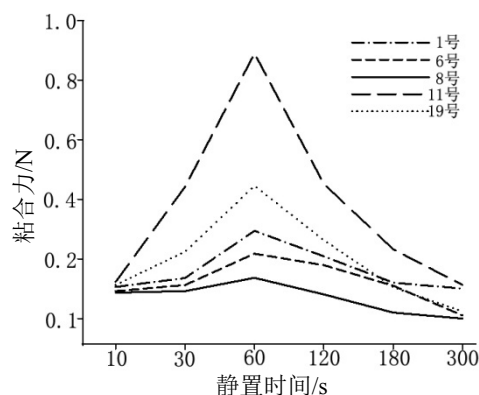


图 3 静置时间优化  
Fig.3 Optimization of the standing time

### 2.4 拉伸速度

按照模拟抽烟时嘴唇离开滤嘴的实际情况兼测试仪能测定到粘唇力,分别设置 10 mm/min、20 mm/min、30 mm/min、50 mm/min、100 mm/min、150 mm/min 进行试验,发现拉伸速度太慢,在还未拉伸至断开时人工唾液已被纸张吸收或已经挥发,测不到粘合力。拉伸过快和实际模拟抽烟过程不符。分别对上述 5 个样品进行试验,设定接装纸和嘴唇的粘合长度为 10 mm,粘合面积  $10 \times 15 = 150 \text{ mm}^2$ ,人工唾液量为 6  $\mu\text{L}$ ,静置时间 1 min,对比试验如图 4 所示,5 种材料均在拉伸速度为 50 mm/min 时达最大粘合力,确定拉伸速率为 50 mm/min。

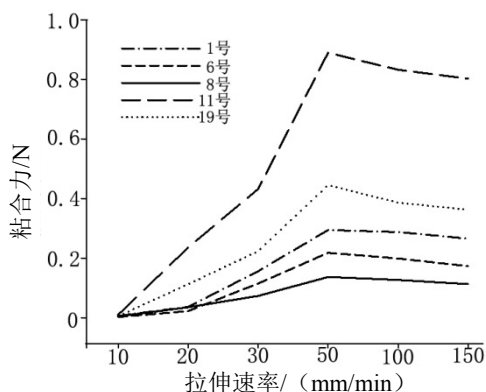


图 4 拉伸速率优化  
Fig.4 Optimization of the extension rate

### 2.5 测试结果

实验条件: 设定接装纸和嘴唇的粘合长度为 10 mm,粘合面积  $10 \times 15 = 150 \text{ mm}^2$ ,按照 50 mm/min 的拉伸速率,人工唾液量为 6  $\mu\text{L}$ ,医用硅胶为人造嘴唇,静置时间为 1 min,利用剥离强度测试仪进行剥离测试,两个夹具夹子分别夹紧为未粘合的剩余部分,如

图 1 所示。在接装纸和人造嘴唇分开瞬间采集到最大力模拟为粘唇力，将单位面积上的粘唇力换算为粘唇强度。基于动摩擦系数是大多数卷烟企业烟用纸张普遍测量的物理指标，具有普适性和易得性，且动摩擦

系数较静摩擦系数更能模仿实际抽吸的过程，建模时的数学回归结果更好。因此，选用常规测试物理指标厚度、定量和动摩擦系数按 1.2.3 测定，20 个样品的测定结果见表 5。

表 5 不同接装纸粘唇强度、厚度、定量和动摩擦系数测定值  
Tab.5 Test results of adhesive force, thickness, grammage and dynamic friction coefficient of different tipping paper samples

| 样品 | 粘唇强度/(N/mm <sup>2</sup> ) | 动摩擦系数 | 厚度/mm | 定量/(g/m <sup>2</sup> ) | RSD/%    |
|----|---------------------------|-------|-------|------------------------|----------|
| 1  | 1.96×10 <sup>-3</sup>     | 0.409 | 0.043 | 39.28                  | 1~6.9    |
| 2  | 0.68×10 <sup>-3</sup>     | 0.254 | 0.047 | 42.30                  | 1.2~7.2  |
| 3  | 1.20×10 <sup>-3</sup>     | 0.374 | 0.042 | 36.90                  | 1.3~7.7  |
| 4  | 1.29×10 <sup>-3</sup>     | 0.404 | 0.042 | 38.70                  | 0.5~9.2  |
| 5  | 2.90×10 <sup>-3</sup>     | 0.432 | 0.044 | 39.30                  | 0.2~9.8  |
| 6  | 1.45×10 <sup>-3</sup>     | 0.293 | 0.045 | 38.50                  | 0.6~8.2  |
| 7  | 3.95×10 <sup>-3</sup>     | 0.541 | 0.043 | 36.34                  | 1.2~9.2  |
| 8  | 0.91×10 <sup>-3</sup>     | 0.287 | 0.046 | 41.54                  | 1.5~10   |
| 9  | 4.40×10 <sup>-3</sup>     | 0.600 | 0.043 | 37.54                  | 1.4~9.3  |
| 10 | 0.87×10 <sup>-3</sup>     | 0.300 | 0.042 | 42.10                  | 0.9~8.2  |
| 11 | 5.93×10 <sup>-3</sup>     | 0.750 | 0.040 | 37.10                  | 1.6~8.4  |
| 12 | 1.10×10 <sup>-3</sup>     | 0.373 | 0.046 | 42.40                  | 1.4~9.6  |
| 13 | 4.04×10 <sup>-3</sup>     | 0.608 | 0.040 | 36.40                  | 0.2~7.2  |
| 14 | 1.20×10 <sup>-3</sup>     | 0.367 | 0.042 | 39.62                  | 1.5~8.5  |
| 15 | 1.21×10 <sup>-3</sup>     | 0.306 | 0.040 | 37.94                  | 1.0~9.8  |
| 16 | 1.32×10 <sup>-3</sup>     | 0.463 | 0.040 | 39.06                  | 1.7~9.2  |
| 17 | 1.31×10 <sup>-3</sup>     | 0.285 | 0.044 | 41.28                  | 1.0~7.7  |
| 18 | 2.90×10 <sup>-3</sup>     | 0.266 | 0.044 | 39.32                  | 1.6~8.2  |
| 19 | 2.97×10 <sup>-3</sup>     | 0.323 | 0.040 | 38.54                  | 2.2~9.7  |
| 20 | 3.47×10 <sup>-3</sup>     | 0.381 | 0.093 | 92.00                  | 3.2~10.0 |

实验结果表明：在人造嘴唇为医用硅胶的条件下，几种接装纸的粘唇强度范围为：0.68×10<sup>-3</sup>~5.93×10<sup>-3</sup> N/mm<sup>2</sup>。为验证实验测试结果的准确性，邀请 12 位专家对 1~20 号接装纸卷制样品抽样进行唇触感评吸，评审方法为多组编码暗评，测试结果见图 5。对比表 5 和图 5 可知，粘唇强度实验结果高于 3.5×10<sup>-3</sup> N/mm<sup>2</sup>

的样品，超过半数的专家认为粘唇性明显，其中 9 号和 11 号两个样品，12 个专家均认为有明显的粘唇性，2 号样品测试结果为 0.68×10<sup>-3</sup> N/mm<sup>2</sup>，12 个专家均认为没有粘唇性。由此可见，剥离强度测试仪经条件优化后测定的实验结果与感官评吸结果一致，说明粘唇强度的测试方法可靠、准确。

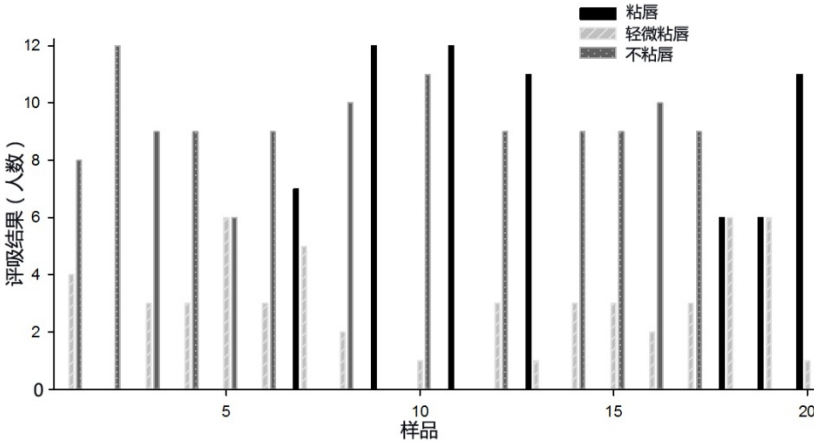


图 5 烟用接装纸粘唇性评吸结果  
Fig.5 Results of lip adhesion evaluation of cigarette paper

2.6 接装纸粘唇力模型的建立

(0.040~0.047 g/m<sup>2</sup>)、厚度范围(36.34~42.40 mm)下与粘唇力之间相关性不显著。

表 6 可以看出, 指标动摩擦系数与粘唇力之间具有较高的相关性程度(0.813\*\*), 另外在定量范围

表 6 粘唇力、厚度、定量和动摩擦系数四个指标之间相关系数情况汇总表

Tab.6 Summary table of correlation coefficients among the adhesive force, thickness, grammage, and dynamic friction coefficient

|       | 动摩擦系数 | 厚度     | 定量      | 粘唇力     |
|-------|-------|--------|---------|---------|
| 动摩擦系数 | 1     | -0.125 | -0.138  | 0.813** |
| 厚度    |       | 1      | 0.989** | 0.119   |
| 定量    |       |        | 1       | 0.089   |
| 粘唇力   |       |        |         | 1       |

注: \*\*表示  $P$  值在 0.01 水平(双侧)上显著相关,  $N=20$ 。

Note: \*\* indicates a significant correlation between  $P$  values at the 0.01 level (bilateral),  $N=20$ 。

通过对动摩擦系数、厚度、定量与粘唇力进行逐步回归方程后发现, 由于厚度与定量之间存在强的共线性(表 6), 且两者与粘唇力的相关性上没有体现,

另外按照概率显著性小于 0.05 的变量进入和概率显著性大于 0.1 的变量排除步进方法准则下将厚度与定量选项剔除(表 7)。

表 7 对动摩擦系数、厚度、定量进行逐步回归后排除的变量

Tab.7 Variables eliminated after stepwise regression on dynamic friction coefficient, thickness, and quantification

| 模型 | 回归系数 | $t$ 值 | 显著性   | 偏相关   | 共线性统计量 |
|----|------|-------|-------|-------|--------|
|    |      |       |       |       | 容差     |
| 1  | 厚度   | 0.223 | 1.693 | 0.109 | 0.380  |
|    | 定量   | 0.204 | 1.526 | 0.145 | 0.347  |

表 8 动摩擦系数与粘唇力的回归方程模型信息

Tab.8 Regression equation model information of sliding friction coefficient and lip adhesion force

| 模型 | R 系数  | $R^2$ | 调整后 $R^2$ | 标准误差 |
|----|-------|-------|-----------|------|
| 1  | 0.813 | 0.661 | 0.642     | 0.13 |

表 9 动摩擦系数与粘唇力的回归方程模型检验

Tab.9 Regression equation model test of sliding friction coefficient and lip adhesive force

| 模型 | 平方和   | 自由度 | 均方    | $F$ 值  | 显著性     |
|----|-------|-----|-------|--------|---------|
| 回归 | 0.613 | 1   | 0.613 | 35.063 | <0.0001 |
| 残差 | 0.315 | 18  | 0.017 |        |         |
| 总计 | 0.928 | 19  |       |        |         |

表 10 动摩擦系数与粘唇力的回归方程模型系数

Tab.10 Regression equation model coefficients of sliding friction coefficient and lip adhesion force

| 模型    | 非标准化系数 |       | 标准系数  | $t$ 值  | 显著性   |
|-------|--------|-------|-------|--------|-------|
|       | 回归系数   | 标准误差  |       |        |       |
| 常量    | -0.204 | 0.096 |       | -2.122 | 0.048 |
| 动摩擦系数 | 1.353  | 0.228 | 0.813 | 5.921  | 0.000 |

表 8~10 仅保留了动摩擦系数作为代表性选项, 利用 SPSS 软件获得的一元回归方程模型为:  $F_{粘唇力(剥离力)} = -0.204 + 1.353 \times X_{动摩擦系数}$ , 回归方程和系数均达到  $P < 0.05$  的显著性水平。由于上述公式计算获得的接装纸粘唇力只是代表本装置设定的接装纸和嘴唇的粘合面积为 150 mm<sup>2</sup> 时的接装纸粘唇力, 为获得粘唇强度, 需要

利用 1.2.3 节中的公式(1)中将  $S$  带入接装纸和嘴唇的粘合面积 150 mm<sup>2</sup>, 其中公式(1)中  $F$  代表上述获得的一元回归方程  $F_{粘唇力(剥离力)} = -0.204 + 1.353 \times X_{动摩擦系数}$  进行换算后, 最终获得公式:

$$Y_{粘唇强度} = -1.36 \times 10^{-3} + 9.02 \times 10^{-3} \times X_{动摩擦系数} \dots (X > 0.151) \quad (4)$$

纸张的动摩擦系数均大于零, 因此本公式的定义

域为  $X$  大于 0.151。

2.7 接装纸粘唇强度模型的使用与验证

2.7.1 模型的使用

按照 1.2.2 准备的样品, 挑选了除 1 号、6 号、8 号、11 号、19 号的其余不同印刷工艺、不同牌号的接装纸, 测定接装纸动摩擦系数, 并根据公式 (4) 预测接装纸的粘唇强度, 同时按照剥离强度测试仪对相同样品进行模拟粘唇强度的测试, 对比结果见表 11。

表 11 烟用接装纸粘唇强度预测值与实测值对比  
Tab.11 Comparison of the predicted and measured Lip-adhesion strength of cigarette paper

| 样品 | 动摩擦系数 | 预测粘唇强度/<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 实际粘唇强度/<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |
|----|-------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1  | 0.404 | $2.28 \times 10^{-3}$           | $1.96 \times 10^{-3}$           |
| 2  | 0.293 | $1.28 \times 10^{-3}$           | $1.07 \times 10^{-3}$           |
| 3  | 0.541 | $3.52 \times 10^{-3}$           | $2.98 \times 10^{-3}$           |
| 4  | 0.432 | $2.54 \times 10^{-3}$           | $2.62 \times 10^{-3}$           |
| 5  | 0.287 | $1.23 \times 10^{-3}$           | $1.22 \times 10^{-3}$           |
| 6  | 0.600 | $4.05 \times 10^{-3}$           | $3.36 \times 10^{-3}$           |
| 7  | 0.341 | $1.72 \times 10^{-3}$           | $1.62 \times 10^{-3}$           |
| 8  | 0.550 | $3.60 \times 10^{-3}$           | $2.89 \times 10^{-3}$           |
| 9  | 0.373 | $2.00 \times 10^{-3}$           | $1.98 \times 10^{-3}$           |
| 10 | 0.484 | $3.01 \times 10^{-3}$           | $4.02 \times 10^{-3}$           |

2.7.2 模型的准确度

图 6 是预测值和实测值的比较, 可以看出数据点落在 1:1 线附近,  $R^2$  为 0.97, nRMSE 为 7.26%, 各样品的粘唇强度预测值与实测值基本吻合, 且实测值普遍比预测值小, 可能跟建模时和实测时操作的外部条件例如温度、湿度和人员有关。

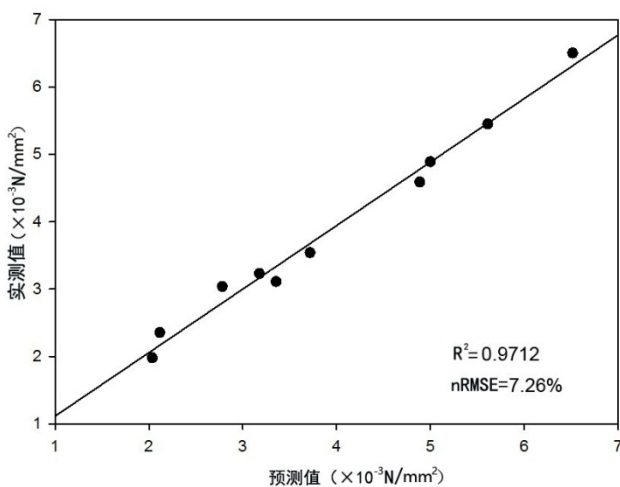


图 6 烟用接装纸粘唇强度预测值与实测值对比

Fig.6 Comparison of the predicted and measured lip-adhesion strength of cigarette paper

3 结论

为探究烟用接装纸印刷面的动摩擦系数、接装纸厚度、定量三者和其粘唇力的关系。本研究利用具有生物活性的人工唾液将接装纸和人造嘴唇进行粘合, 静置一段时间后, 选用剥离强度测试仪定量测定了二者之间的剥离力, 此剥离力可用于模拟烟用接装纸的粘唇力。经过条件对比优化筛选, 确定了实验条件是: 选用医用硅胶作为人造嘴唇, 接装纸和嘴唇的粘合长度为 10 mm, 粘合面积是  $10 \times 15 = 150 \text{ mm}^2$ , 按照 50 mm/min 的拉伸速率, 人工唾液量为 6  $\mu\text{L}$ , 静置时间为 1 min。采用人工感官评吸和测定值进行对比, 验证了上述实验方法的可靠性。将粘唇力与不同类型接装纸常规指标动摩擦系数、厚度和定量的数据基础进行建模。模型表达为:  $Y_{\text{粘唇强度}} = -1.36 \times 10^{-3} + 9.02 \times 10^{-3} \times X_{\text{动摩擦系数}}$ 。检验模型准确度时发现, 预测值与实测值基本落在 1:1 线附近, 决定系数  $R^2$  为 0.97, 归一化均方根误差 nRMSE 为 7.26%。本研究提供了一种能快速、简便定量烟用接装纸对嘴唇粘合力方法, 可以很好的避免传统的借助人工感官评吸带来的主观因素影响和差异性表征, 更加客观、高效, 且重复性好、操作简单, 可为行业物料准入、质量管控、升级产品提供理论依据。

参考文献

[1] Yanchuang Feng, Zhen Zhang, Dongdong Feng, et al. Optimization of determination method of cooling agents in cigarette tipping paper by gas chromatography[J]. LC-GC North America, 2022, 40: 180-185.

[2] O'Connor Richard J, Bansal-Travers Maansi, Cummings K. Michael, et al. Filter presence and tipping paper color influence consumer perceptions of cigarettes[J]. BMC Public Health, 2015, 15: 1279.

[3] Guanghui Kong, Jing Liu, Peipei Yin, et al. A new antibacterial indole alkaloid from cigar tobacco and its potential application in antiseptic cigarette tipping paper[J]. Chemistry of Natural Compounds, 2024, 60(5): 885-890.

[4] Dawei Chen, Ziyue Ni, Mingbo Liu, et al. Determination of trace Cr, Ni, Hg, As, and Pb in the tipping paper and filters of cigarettes by monochromatic wavelength X-ray fluorescence spectrometry[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B-Beam Interactions with Materials and Atoms, 2021, 502: 59-65.

[5] Huipeng Deng, Talpur Zakir H, Kaijun Wang, et al. SERS determination of sodium saccharin content on the tipping paper of cigarettes using AgNP substrates prepared with a USB-power supply device[J]. Analytical methods: advancing methods and applications, 2023, 15(35): 4524-4532.

[6] Smith Donna, Wiecek Paige, Coggins Christopher. et al. A

- comprehensive evaluation of the toxicology of monogram inks added to experimental cigarettes[J]. *Inhalation Toxicology*, 2013, 2(25): 34-45.
- [7] 李锋. 一种不粘嘴唇防止唇舌干燥的香味保健水松纸及其制备方法: 中国, CN104594109A[P]. 2015-05-06.  
LI Feng. A non-stick lips to prevent dry lips of the fragrance of health care pine paper and the invention relates to the preparation method: China, CN104594109A[P]. 2015-05-06.
- [8] 潘文, 陆俊平, 王金良, 等. 一种防粘唇防污染的过滤嘴: 中国, CN204742617U[P]. 2015-11-11.  
PAN Wen, LU Junping, WANG Jinliang, et al. The utility model relates to an anti-stick lip and anti-contamination filter: China, CN204742617U[P]. 2015-11-11.
- [9] 徐伟, 周建芳, 俞红卫, 等. 一种多功能水松纸: 中国, CN206219893[P]. 2017-06-06.  
XU Wei, ZHOU Jianfang, YU Hongwei, et al. A multifunctional hydropine paper: China, CN206219893[P]. 2017-06-06.
- [10] ShotaroKadoya, FuminobuKimura, YusukeKajihara. Tester for tensile shear evaluation of metal-polymer single lap joints[J]. *Precision Engineering*, 2018, 54: 321-326.
- [11] Raziye S, MohammadiSeyed H, Tabatabaei, AbdellahAji. Peelable clay/PE nanocomposite seals with ultra-wide peelable heat seal temperature window[J]. *Applied Clay Science*, 2018, 158: 132-142.
- [12] 兰辉程. 烟用接装纸制造技术的发展及其趋势[J]. *造纸信息*, 2021, 1: 87-88.  
LAN Huicheng. The development and trend of the manufacturing technology of cigarette tipping paper[J]. *China paper newsletters*, 2021, 1: 87-88.
- [13] Dai Tong, Wang Jing, He Di, et al. Adaptability of APSIM model in southwestern China: a case study of winter wheat in chongqing city[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(4): 1237-1243.
- [14] Shen Jie, Cai Yan, He Yuting, et al. Dynamic simulation of dry matter accumulation in flue-cured tobacco and analysis of its characteristics based on normalized method[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(3): 442-453.
- [15] 朱大年. 生理学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2009: 171.  
ZHU Danian. *Physiology*[M]. Beijing: people's medical publishing house, 2009: 171.
- [16] Chou CC, Que He SS. Saliva-available carbony compounds in some chewing tobaccos[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1994, 42: 2225-2230.
- [17] Yamini Morjaria, William J Irwin, Paul X Barnett, et al. In vitro release of nicotine from chewing gum formulations[J]. *Dissolution Technologies*, 2004, 5: 12-15.

## Modeling of lip sticking degree of cigarette tipping paper and its application research

YANG Ji, YIN Zhijiang, GUO Lijuan, ZHANG Tao, TIAN Ran, FANG Duoqing, YE Ling,  
WANG Hao, TANG Shiyun, LI Zhenjie, YANG Xi\*

R&D Center of China Tobacco Yunnan Industrial Co., Ltd., Kunming 650231, China

**Abstract:** To quickly and accurately determine the adhesive degree of cigarette tipping paper to lips, a model prediction method of cigarette paper lip adhesion degree was proposed. A peel strength tester was used to measure the adhesion force between various cigarette papers and artificial lips bonded with artificial saliva. The measured values were compared with human sensory evaluation. Through comparison and optimization, the experimental conditions were determined as follows: medical-grade silicone was selected as the artificial lip; artificial saliva containing bioactive components such as proteins, enzymes, and inorganic salts was prepared; the bonding length between the cigarette paper and the lip was 10 mm, with a bonding area of 150 mm<sup>2</sup>, tensile speed of 50 mm/min, artificial saliva volume of 6  $\mu$ L, and a standing time of 1 min. The lip-sticking degree of tipping paper was strongly correlated with its friction coefficient. Therefore, a prediction model for lip-sticking degree was developed using the dynamic friction coefficient. The predicted values were largely consistent with the measured values, with a coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.97 between predicted and observed values and a normalized root mean square error ( $nRMSE$ ) of 6.4–7.26%. These results indicate that the model is accurate and reliable. This method allows for the quick, convenient, and quantitative determination of the lip-sticking degree of tipping paper, eliminating the influence of subjective factors and variations in panel sensory evaluation.

**Keywords:** cigarette tipping paper; lip sticking degree; peel strength tester; sliding friction coefficient tester; peel force; artificial mouth skin

\*Corresponding author. Email: yxi@ynzy-tobacco.com