

# 卷烟燃烧动态吸阻研究

## Study on dynamic suction resistance of cigarette during combustion

刘欢<sup>1</sup> 王乐<sup>2</sup> 胡少东<sup>1</sup> 杨金初<sup>1</sup> 李斌<sup>2</sup>

LIU Huan<sup>1</sup> WANG Le<sup>2</sup> HU Shao-dong<sup>1</sup> YANG Jin-chu<sup>1</sup> LI Bin<sup>2</sup>

(1. 河南中烟工业有限责任公司技术中心, 河南 郑州 450000; 2. 中国烟草总公司郑州烟草研究院, 河南 郑州 450001)

(1. Technology Center, China Tobacco Henan Industrial Co., Ltd, Zhengzhou, Henan 450000, China;

2. Zhengzhou Tobacco Research Institute of CNTC, Zhengzhou, Henan 450001, China)

**摘要:**为了研究卷烟燃烧过程中动态吸阻的变化特性及其影响因素,选取 3R4F 标准卷烟作为试验样品,运用建立的动态吸阻计算方法考察了烟支燃烧过程中动态吸阻随燃烧线位置的变化规律,并分别分析了烟支中烟丝密度、不同抽吸状态(有滤嘴通风、无滤嘴通风和烟丝部分)以及不同抽吸模式对烟支动态吸阻的影响规律。结果表明:烟支动态吸阻随燃烧线长度呈现先增大、后降低并趋于平稳、最后再增大的趋势;烟支两端烟丝密度大的部分具有较大的动态吸阻值,烟支中间密度稳定部分具有较均匀的动态吸阻值;对于 3 种不同抽吸状态,静态吸阻与动态吸阻的差异性显著,按照偏差分析由小到大的排序为:有滤嘴通风<无滤嘴通风<烟丝部分;不同抽吸模式下测试所得的静态吸阻值相近,烟支前半部分的动态吸阻相差不大,后半部分的动态吸阻相差较大,有利于根据不同抽吸模式的人群进行卷烟设计,从而达到提高卷烟感官质量的目的。

**关键词:**动态吸阻;燃烧线;烟丝密度;抽吸模式

**Abstract:** In order to study the changes and the influencing factors of dynamic suction resistance during cigarette combustion, selecting 3R4F as the experimental samples and building the calculation methods for dynamic suction resistance investigated the change of dynamic suction resistance with the position of the combustion line during the combustion. Analyzed the effects of tobacco density, different suction conditions and different suction modes on the dynamic suction resistance of cigarette. Conclusions can be drawn as the following: the dynamic suction resistance of cigarette was increasing first, then decreasing and stabilizing with the position of combustion line, and then increasing; the parts with larger density of the cigarettes had larger dynamic suction value and the intermediate parts with stable

density of the cigarette have relatively uniform dynamic resistance; the static suction value obtained in the different suction mode was similar; the dynamic suction resistance of the first half of the cigarette was not much different and the dynamic resistance of the latter part was different, which was conducive to the cigarette design of different groups according to the different suction modes, so as to achieve the purpose of improving the sensory quality of cigarettes.

**Keywords:** Dynamic suction resistance; Burning line; Tobacco density; Suction mode

卷烟感官质量不仅受到静态条件下烟支重量、吸阻、通风率、硬度、压降等重要指标的影响,而且受到卷烟在燃吸过程中吸阻、通风率、压降等指标的影响。其中卷烟燃吸过程中,动态吸阻的大小直接影响着消费者对卷烟感官质量的评价,同时也是影响烟气中化学成分组成的重要因素之一,因此研究卷烟燃烧过程中动态吸阻的变化对提高卷烟感官质量具有重要的指导意义。目前国内外对卷烟在未燃烧情况下的吸阻研究已经相当成熟,主要集中在吸阻与单支支重相关性分析<sup>[1-2]</sup>、吸阻与卷烟其他物理指标相关性分析<sup>[3-5]</sup>、吸阻稳定性影响因素分析<sup>[6-8]</sup>以及卷烟吸阻模型<sup>[9-10]</sup>方面。

国外对卷烟燃烧过程中抽吸压力以及通风状况有了初步的研究,为了更加精确地评估吸烟者在抽烟过程中的感觉,文献<sup>[11]</sup>建立了相关模型对卷烟抽吸过程中抽吸阻力的变化进行了理论研究并开发了卷烟抽吸阻力测试装置。为了研究原材料和燃烧过程对产品特性的贡献度,文献<sup>[12]</sup>建立了卷烟燃烧过程中压力和通风的数学模型,该模型可以用来评价各种影响因素对卷烟燃烧过程中压力和通风的贡献度。

尽管卷烟燃烧过程中的抽吸阻力变化规律可以反映动态吸阻的变化规律,但是仍然缺乏直观性。运用数学模型来刻画卷烟燃烧过程中抽吸压力的变化规律尽管具有先进的理论指导意义,但是模拟精度以及模型参数的精确获取存在一定的局限性。本研究拟运用建立的动态吸阻计算方法考

**作者简介:**刘欢,男,河南中烟工业有限责任公司技术中心初级工程师,硕士。

**通信作者:**李斌(1976—),男,中国烟草总公司郑州烟草研究院研究员,博士。E-mail: ztrilibin@163.com

**收稿日期:**2017-03-02

察烟支密度分布、抽吸状态及抽吸模式对卷烟动态吸阻的影响规律,并系统研究3R4F卷烟在3种不同抽吸状态下动态吸阻随燃烧线位置的变化规律,给出卷烟动态吸阻分布情况。卷烟设计工作者可通过设计卷烟通风以及调整烟支密度分布,从而达到提高卷烟感官质量的目的,进一步满足消费者对卷烟舒适度的需求。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料、设备与仪器

3R4F标准卷烟:由University of Kentucky制作的标准参比卷烟,其卷烟长度×烟支长度×烟支圆周为84 mm×57 mm×24.8 mm;

微孔道压力检测实验平台:量程为-2 048~2 048 Pa,测量误差±5 Pa,采样频率10~50 Hz,郑州烟草研究院研制;

单孔道吸烟机:SM-100型,中国科学院安徽光学精密机械研究所;

烟支综合分析仪:STA449型,德国Netzsch公司;

烟支密度分析仪:MWW3220型,德国TEWS公司;

电子天平:AB104-N型,奥豪斯仪器有限公司。

### 1.2 方法

将3R4F标准卷烟在恒温恒湿实验室中,于环境温度(22±2)℃、湿度(60±5)%条件下平衡48 h。

1.2.1 动态吸阻计算方法 图1表示卷烟在ISO标准钟形抽吸模式下,卷烟出口气流压降随抽吸时间的变化规律,由于抽吸流速与压差成正比<sup>[9]</sup>,故图1也可以表示抽吸流量随抽吸时间的变化规律。

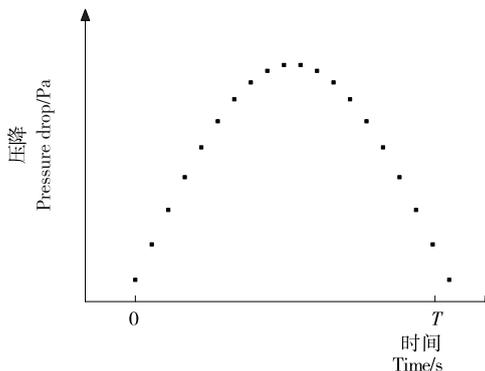


图1 钟形抽吸模式下的压力曲线

Figure 1 Pressure curve in bell-shaped suction mode

标准抽吸符合正弦曲线,故抽吸流量 $V$ 服从正弦曲线变化规律:

$$V = A \sin(Bt) \quad (1)$$

已知抽吸容量为 $Q$  mL,抽吸周期为 $T$  s,则 $B = \frac{\pi}{\tau}$ ,由

$$\int_0^{\tau} A \sin(Bt) dt = Q \quad (2)$$

$$\text{求出 } A = \frac{\pi Q}{2\tau}.$$

由于抽吸流速与压差成正比<sup>[9]</sup>,则有以下关系成立:

$$\frac{V_{\max}}{V_{17.5}} = \frac{P_{\max}}{P_{17.5}}, \quad (3)$$

$$P_{17.5} = P_{\max} \frac{2TV_{17.5}}{\pi Q}, \quad (4)$$

式中:

$P_{\max}$ ——抽吸流量为 $V_{\max}$ 时的压力差,Pa;

$P_{17.5}$ ——所求的吸阻数值,Pa。

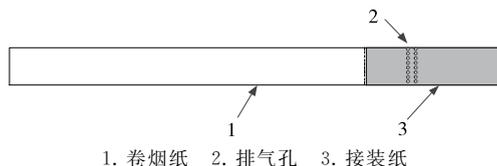
1.2.2 动态吸阻测试方案 本试验测试了标准抽吸模式下3种不同抽吸状态的动态吸阻数据和有滤嘴通风情况下4种不同抽吸模式的动态吸阻数据。表1给出了4种不同抽吸模式的抽吸参数。

表1 4种不同抽吸模式的抽吸参数

Table 1 Suction parameters in four different suction modes

抽吸模式	抽吸容量/mL	抽吸时间/s	抽吸间隔/s
ISO	35	2	60
马萨诸塞	45	2	30
加拿大	55	2	30
深度抽吸	60	2	30

抽吸状态设计:无滤嘴通风情况下烟支动态吸阻测试时需要采用胶带将嘴棒处的排气孔(图2)密封住,烟丝部分动态吸阻测试时需要用刀片将接装与卷烟纸连接处划开,仅对卷烟纸包裹的烟丝部分进行测试。



1. 卷烟纸 2. 排气孔 3. 接装纸

图2 卷烟外观示意图

Figure 2 The appearance of cigarettes

燃烧线位置测试:用点烟器将烟支点燃(接触时间为15 s),记录吸烟机第一次抽吸时刻的燃烧线长度作为第一次抽吸时燃烧线位置;以后吸烟机第 $n$ 次抽吸时刻的燃烧线长度作为第 $n$ 次抽吸时燃烧线的位置。卷烟燃烧线的获取是采用刻度尺对卷烟燃烧线位置进行测量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 吸阻测试仪器方差分析

对标准卷烟3R4F分别采用综合测试台和微孔道压力检测实验平台进行测试,测试结果见表2。其中测试1数据是由微孔道压力检测实验平台测得的压差数据,并按照1.2中所述方法换算而来,测试2数据是采用综合测试台测试。

对表2中数据进行方差分析,其分析结果见表3, $P = 0.496 5 > 0.05$ ,因此认为测试1和测试2没有显著性差异。

### 2.2 烟支密度对动态吸阻的影响

图3给出了动态吸阻和烟支密度随烟支轴向长度的变化情况,其中动态吸阻的第一个数据点是烟支在未点燃情况下的静态吸阻。由图3可知,烟支的两端具有较大的密度数值,同时此处的动态吸阻数值也较大;烟支中间区域密度分

表 2 吸阻测试数据

Table 2 Suction resistance test data

样品序号	测试 1	测试 2	样品序号	测试 1	测试 2
1	1 180	1 136	11	1 224	1 226
2	1 221	1 223	12	1 136	1 140
3	1 277	1 134	13	1 226	1 226
4	1 138	1 226	14	1 227	1 191
5	1 221	1 224	15	1 139	1 200
6	1 048	1 137	16	1 227	1 201
7	1 280	1 226	17	1 054	1 176
8	1 224	1 051	18	1 228	1 145
9	1 221	1 226	19	1 227	1 252
10	1 164	1 227	20	1 221	1 050
平均值	1 194	1 181	标准差	62	57

表 3 吸阻数据方差分析表

Table 3 Analysis of variance data of suction resistance data

差异源	SS	df	MS	F	P 值	F 值
组间	1 748.60	1	1 748.60	0.471 5	0.496 5	4.10
组内	140 916.17	38	3 708.32			
总计	142 664.77	39				

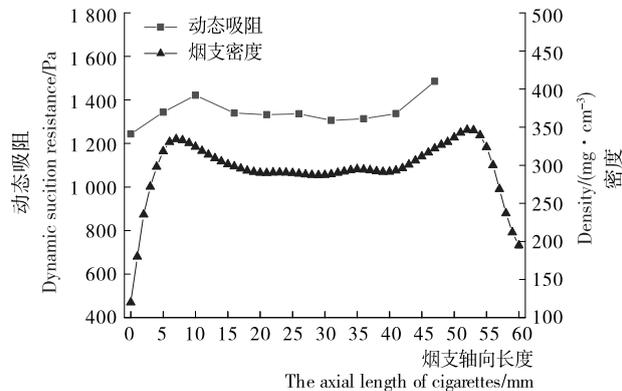


图 3 动态吸阻和烟支密度随烟支轴向长度的变化情况

Figure 3 The variation with the axial length of cigarette of dynamic suction resistance and cigarette density

布稳定,此处的动态吸阻数值也趋于均匀。

由烟支密度随着烟支轴向长度的变化可知:在 0~5 mm 时,烟支密度由零逐渐增大;在 5~15 mm 时,烟支密度又逐渐下降;在 15~40 mm 时,烟支密度趋于平稳;在 40~50 mm 时,烟支密度又逐渐增大。由动态吸阻随烟支轴向长度的变化可知:烟支前端,动态吸阻沿轴向长度先增大后减小;在烟支中间部分,动态吸阻随轴向长度变化不大,并趋于平稳;在烟支后端,动态吸阻又有增大趋势。可以根据该研究结果合理设计烟丝在卷烟中的填充性能,从而达到提高卷烟抽吸过程中动态吸阻稳定性的目的。

### 2.3 抽吸状态对动态吸阻的影响

图 4 给出了标准卷烟 3R4F 在 3 种不同抽吸状态下(有滤嘴通风、无滤嘴通风和烟丝部分)动态吸阻随轴向长度(燃

烧线位置)的变化情况,其中第一个数据为烟支未点燃情况下的静态吸阻,第二个数据为烟支点燃后第一次抽吸时的动态吸阻。有滤嘴通风和无滤嘴通风情况下,卷烟动态吸阻均呈现出两端吸阻大中间吸阻小的趋势;在仅有烟丝部分抽吸状态时,卷烟动态吸阻前段吸阻大、中间吸阻与尾端吸阻值相近的趋势,该现象是由抽吸过程中没有卷烟滤嘴造成的。

由表 4 可知,在有滤嘴通风情况下,静态吸阻到第一口抽吸时动态吸阻的增加值最小,增加的百分比也最小;在仅有烟丝部分抽吸的情况下,静态吸阻到第一口抽吸时动态吸阻的增加值最大,增加的百分比也最大。说明嘴棒的存在可以减小静态吸阻和动态吸阻的差异性,而且通过设计嘴棒的通风率可以使两者间差异性最小。根据该研究结果合理优化滤嘴的通风率,可以改善卷烟抽吸过程中的舒适度,从而达到提高消费者对卷烟的认可度。

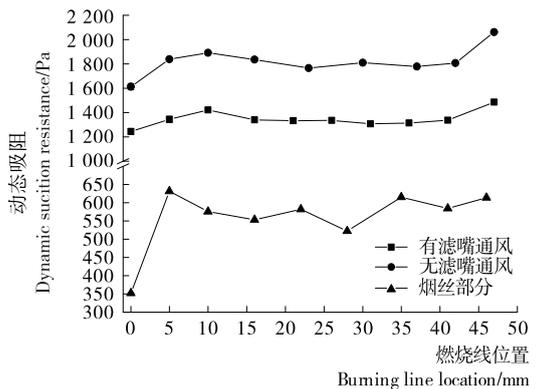


图 4 动态吸阻随烟支轴向长度的变化情况

Figure 4 The variation with the axial length of the cigarette of dynamic suction resistance varies

表 4 卷烟静态吸阻与动态吸阻对比表<sup>†</sup>

Table 4 Comparison of static suction and dynamic suction resistance of cigarettes

测试状态	$P_{stat}/Pa$	$P_{dyn}/Pa$	$\Delta P/Pa$	$M/\%$
有滤嘴通风	1 244	1 343	99	8
无滤嘴通风	1 613	1 838	225	14
烟丝部分	352	632	280	80

<sup>†</sup>  $P_{stat}$  为静态吸阻,  $P_{dyn}$  为第一口抽吸时的动态吸阻,  $\Delta P$  表示  $P_{dyn}$  与  $P_{stat}$  的差值,  $M$  表示静态吸阻到第一口抽吸时增加的百分比。

### 2.4 抽吸模式对动态吸阻的影响

图 5 给出了不同抽吸模式下标准卷烟 3R4F 动态吸阻随烟支轴向长度(燃烧线位置)的变化情况,其中第一个数据点是烟支在未点燃时的静态吸阻。由图 5 可知:不同抽吸模式下烟支的静态吸阻相差不大;4 种抽吸模式下动态吸阻随燃烧线位置的变化规律均呈现出两端吸阻大中间吸阻小的规律;不同抽吸模式下测试所得的静态吸阻值相近,烟支前半部分的动态吸阻相差不大,后半部分的动态吸阻相差较大。3 种抽吸模式(马萨诸塞、加拿大和深度抽吸)下,后半部分的动态吸阻中深度抽吸的吸阻最大,其次为加拿大抽吸模式,这主要是由于不同抽吸容量对烟支内烟丝的组成结构产

生的影响不同引起的。该结果表明,针对不同抽吸习惯的人群,可以根据其抽吸模式特征进行设计卷烟,以保证卷烟抽吸过程中动态吸阻的稳定性,从而达到提高卷烟感官质量的目的。

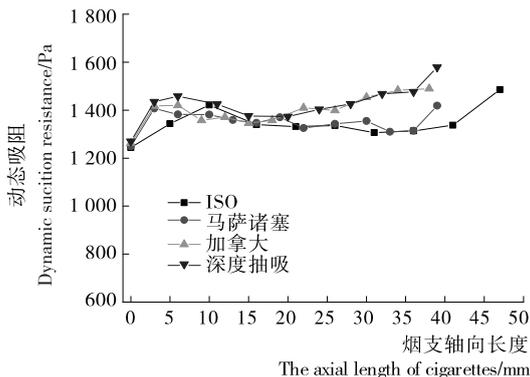


图5 不同抽吸模式下动态吸阻随烟支轴向长度的变化规律

Figure 5 Variation of dynamic suction with axial length of tobacco in different suction mode

### 2.5 卷烟轴向动态吸阻分布图

通过测量得到不同燃烧线位置处卷烟抽吸过程中的动态吸阻,经过线性插值后,可以获得卷烟轴向动态吸阻分布图,见图6。由图6可知,动态吸阻在卷烟前端由小变大的主要原因是:在0~5 mm处由于卷烟端部落丝的存在以及燃烧锥未能完全形成的缘故造成,在10~15 mm时由于较大的烟支密度以及燃烧锥已完全形成,故在此区间内会有较大的动态吸阻值。在15~40 mm时,该区间内卷烟动态吸阻的稳定性较好,与该区间内烟支密度具有较好的平稳性有关。在40~50 mm时卷烟动态吸阻逐渐增大,与烟支密度的变化情况有一定关系。

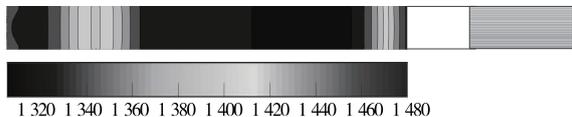


图6 卷烟轴向动态吸阻分布图

Figure 6 Dynamic suction resistance distribution

## 3 结论

卷烟动态吸阻沿轴向长度呈现两端大中间小且稳定的变化趋势,这与卷烟烟支密度分布趋势相同。本试验可以得出以下结论:

(1) 标准抽吸下,3R4F烟支第一次抽吸时的动态吸阻相比于静态吸阻增加为8%,无滤嘴通风时增加约14%,烟丝部分抽吸时增加约80%。因此,合理设计卷烟滤嘴通风率可以进一步降低卷烟动态吸阻与静态吸阻的差异性。

(2) 烟支前半部分抽吸时,4种抽吸模式对烟支动态吸阻影响较小,而在后半部分抽吸时,则出现深度抽吸模式下动态吸阻最大,其次为加拿大抽吸模式。这主要是由于不同抽吸容量对烟支内烟丝的组成结构产生的影响不同引起的。

(3) 卷烟动态吸阻分布图能够很直观地反应动态吸阻

在烟支内的分布情况,卷烟设计工作者可根据卷烟质量及舒适度要求对烟支动态吸阻较大部分进行适度调整,这对卷烟设计及烟草工程应用具有一定的借鉴意义。

本试验通过对烟支中烟丝密度、不同抽吸状态(有滤嘴通风、无滤嘴通风和烟丝部分)以及不同抽吸模式对烟支动态吸阻的影响规律,初步建立了动态吸阻的计算方法以及研究方法,下一步将从烟丝密度均匀性以及卷烟工艺参数对烟支动态吸阻的影响等方面开展相关研究。

### 参考文献

- [1] 张永涛,顾秋林,李智杰,等. 烟支单支质量与吸阻关联关系的实用性研究[J]. 洛阳师范学院学报, 2016(5): 34-36.
- [2] 吕祥敏,程传玲,王鹏. 卷烟单支质量、硬度和吸阻差异性分析[J]. 轻工科技, 2013(7): 137-138.
- [3] 孙东亮,王坤明,魏凤美,等. 卷烟物理指标与吸阻统计关系研究[J]. 中国烟草科学, 2008(4): 42-45.
- [4] 刘丁伟,胡建军,熊燕,等. 总粒相物与烟支重量、吸阻和抽吸口数的相关分析、通径分析[J]. 烟草科技, 2005(8): 3-5.
- [5] 倪克平,范铁楨,王涛. 卷烟硬度、吸阻与单支重相关性分析[J]. 烟草科技, 2002(3): 9-13.
- [6] 廖晓祥,赵云川,邹泉,等. 梗丝形态对细支卷烟品质稳定性的影响[J]. 烟草科技, 2016(10): 74-80.
- [7] 叶鸿宇,许峰,张建中,等. 成丝工艺参数对梗丝结构和卷烟吸阻稳定性的影响[J]. 烟草科技, 2013(11): 11-14.
- [8] 吕祥敏,程传玲,王鹏. 卷烟单支质量、硬度和吸阻差异性分析[J]. 轻工科技, 2013(7): 137-138.
- [9] 王乐,崔晓梦,王兵,等. 不同抽吸状态下卷烟内部气流流动特性的近似分析[J]. 烟草科技, 2016(4): 74-79.
- [10] 高铭,冯银龙,张永江. 滤棒压降与烟支吸阻关系的模型建立[J]. 河南科技, 2013(2): 26-27.
- [11] STEPHANE Colard, REMI Julien. Characterisation of the Draw Resistance Across a Lit Cigarette[J]. Contribution to Tobacco Research, 2013, 25(6): 586-594.
- [12] DWYER R W, PEISHI Chen. Prediction of Pressure Drop and Ventilation in a Lit Cigarette[J]. Contribution to Tobacco Research, 1999, 18(5): 205-211.