

卷烟阴燃完全性对常规烟气指标的影响

Influence of cigarette smoldering completeness on conventional flue gas index

程传玲¹ 牛婷婷¹ 穆林² 赵怡凡¹ 王建民¹

CHENG Chuan-ling¹ NIU Ting-ting¹ MU Lin² ZHAO Yi-fan¹ WANG Jian-min¹

(1. 郑州轻工业大学, 河南 郑州 450001; 2. 贵州中烟工业有限责任公司, 贵州 贵阳 550009)

(1. Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, Henan 450001, China;

2. China Tobacco Guizhou Industrial Co., Ltd., Guiyang, Guizhou 550009, China)

摘要:采用自制设备测定中国 50 种不同牌号卷烟实际可燃率、自由燃烧速度,并结合气相色谱分析常规烟气成分。结果表明:① 实际可燃率与自由燃烧速度呈极显著负相关,即卷烟阴燃越完全,自由燃烧速度越慢。② 实际可燃率与常规烟气中的总粒相物(total particulate matter, TPM)、烟碱、焦油、抽吸口数指标均呈极显著正相关,其中与 TPM 相关性最强;自由燃烧速度与 TPM、烟碱、焦油、抽吸口数指标均呈极显著负相关,其中与 TPM、焦油相关性较强。综合分析卷烟阴燃越完全,自由燃烧速度越慢,则抽吸口数越多,焦油含量越高。

关键词:阴燃完全性;自由燃烧速度;总粒相物;烟碱;焦油

Abstract: In order to explore the influence of the degree of complete combustion on the conventional smoke index in the smoldering state of cigarettes, the actual flammability rate and free burning rate of 50 different cigarettes in China were determined by self-made equipment, combined with the analysis of conventional smoke components in gas chromatography. The results show that: ① The actual flammability rate is significantly negatively correlated with the free combustion rate, that is, the more complete the smoldering of the cigarette, the slower the free burning speed. ② The actual flammability rate is significantly positively correlated with total particulate matter (TPM), nicotine, tar, and suction port number in conventional flue gas, among which TPM has the strongest correlation; Free burning speed and TPM, the indexes of nicotine, tar and suction mouth were all significantly negatively correlated, and the correlation with TPM and tar was strong. Comprehensive analysis indicates that the more complete smoldering of cigarettes, the slower the

free burning speed has, with more the number of suction ports, and the tar content higher.

Keywords: smoldering completeness; free burning speed; total particulate matter (TPM); nicotine; tar

卷烟燃烧分为动态燃烧和阴燃(静态燃烧),动态燃烧仅占烟支燃烧的 1/3,另 2/3 的烟支则是在抽吸间隙阴燃的,而阴燃的稳定性在一定程度上会影响卷烟燃烧速度、烟气释放量及卷烟包灰质量^[1-2]。荆熠^[3]研究发现随着膨胀梗丝比例增加,无论低引燃倾向卷烟和常规卷烟的阴燃速度均增加,焦油、烟碱含量均呈减少趋势。吴宏伟等^[4]研究盐类添加剂可以降低卷烟燃烧热分解活化能,从而提升卷烟燃烧速度,降低焦油含量。王启成^[5]、沈凯等^[6]分别在卷烟纸中添加不同的助燃剂,结果发现随助燃剂含量增加,钾钠比增加,静燃速率增加;在烟丝中添加乙酸钾可以有效降低卷烟燃烧最高温度,并减少主流烟气 CO 的释放量。恽之瑜等^[7]研究发现阴燃状态下的亚硝酸释放量与主流烟气中的焦油、烟碱释放量无明显关系。王宁^[8]、赵继俊等^[9]、沈慧^[10]、高震宇等^[11]分别对卷烟阴燃速率的测定做了不同的改进及优化。颜水明等^[12]研究显示卷烟燃烧低温区域越大则主流烟气中 CO 释放量越多。

综上所述,目前行业内对卷烟阴燃的研究主要集中在燃烧速度和燃烧温度方面,而对于卷烟阴燃完全性与烟气指标间的关系相关报道甚少。本研究拟通过分析中国 50 种不同牌号卷烟实际可燃率、自由燃烧速度对烟气中 TPM、烟碱、焦油、CO、CO₂ 的影响,明确卷烟阴燃完全程度对不同烟气成分释放量的影响规律。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

1.1.1 材料与试剂

卷烟样品: #1~#50 种不同牌号。

作者简介:程传玲,女,郑州轻工业大学副教授,博士。

通信作者:王建民(1963—),男,郑州轻工业大学教授,硕士。

E-mail: wjm@163.com

收稿日期:2018-11-02

异丙醇、无水乙醇:色谱级,天津市大茂化学试剂厂;
正十七烷:纯度 $\geq 98.5\%$,北京百灵威科技有限公司;
烟碱:纯度 $\geq 98\%$,郑州烟草研究院;
纯净水:杭州娃哈哈集团有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

恒温恒湿箱:KBF240型,德国 Binder 公司;
电子天平:SQP 型,感量 0.000 1,德国 Sartorius 公司;
机械秒表:504 型,北京星钻秒表有限公司;
接嘴实验机:SZJ 型,国营平水机械厂;
转盘式吸烟机:RH20 型,德国 Borgwaldt 公司;
气相色谱仪:安捷伦 7890 型,美国 Agilent 公司;
恒温回旋振荡器:THZ-C 型,江苏太仓市华美生化仪器厂。

1.2 方法

1.2.1 卷烟燃烧指标检测

(1) 样品准备:随机选取两盒成品卷烟,每个牌号分别测 4 组,每组 4 支,共 16 支,另有 4 支以备用。在温度 $(22\pm 1)^\circ\text{C}$,相对湿度 $(60\pm 3)\%$ 的环境下平衡 48 h。烟丝剥离试验时每个牌号 20 支,剔除空头烟支,计算烟丝质量均值。

(2) 烟支燃烧:烟支标记如图 1 所示,烟支前端标记为 a,距前端 10 mm(根据烟支长度有所调整)处标记为 b,距前端 50 mm(根据烟支长度有所调整)处标记为 c,ab 之间距离记为 L_1 ,bc 之间距离记为 L_2 ,ac 之间距离记为 L_3 。在 b、c 两点处固定棉线,b 处棉线断裂开始计时,c 处棉线断裂终止计时,并即刻在 c 处沿卷烟轴向垂直剪下烟灰柱,收集并称量 L_3 段烟灰质量记为 m_3 ,时间记为 T 。

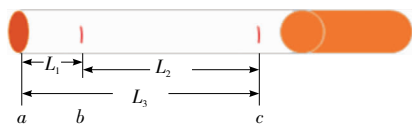


图 1 卷烟燃烧指标检测示意图

Figure 1 Schematic diagram of cigarette burning index detection

(3) 烟丝剥离:取相同烟支样品,在计时启动与终止的相同位置分别作标记 b、c,用 SZJ 接嘴机的切断装置将烟支在 b、c 标记处切断,然后用手术刀片将 L_1 、 L_2 段烟支的烟丝剥离并称量,分别记为 M_1 、 M_2 , M_3 为二者之和。

(4) 自由燃烧速度:卷烟自由燃烧时燃烧区的前沿沿着卷烟轴向推进的平均速度^[13],用 V 表示。

$$V = \frac{L_2}{T}, \quad (1)$$

式中:

V ——自由燃烧速度,mm/min;

L_2 ——计时烟支长度,mm;

T ——计时时间,min。

(5) 实际可燃率:卷烟在自由燃烧时的质量损失与燃烧前的初始质量的比率^[13],用 K 表示。

$$K = \frac{M_3 - m_3}{M_3} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

K ——实际可燃率,%;

M_3 ——燃烧长度的烟丝质量,mg;

m_3 ——计时的烟灰质量,mg。

(6) 可燃率:卷烟中的烟丝在自由燃烧时被烧掉的速率^[13],用 C 表示。

$$C = \frac{M_2}{T}, \quad (3)$$

式中:

C ——可燃率,mg/min;

M_2 ——计时的烟丝质量,mg;

T ——计时时间,min。

1.2.2 烟气指标检测

(1) 样品准备:根据 GB/T 19609—2004 在温度 $(22\pm 1)^\circ\text{C}$,相对湿度 $(60\pm 3)\%$ 的环境下平衡 48 h。

(2) 滤嘴替换:为保证不同牌号卷烟样品滤嘴过滤效果一致,所有样品替换为统一滤嘴。具体操作测量原样品长度、接装纸长度、滤棒长度,若接装纸与滤棒长度之差 < 7 mm 则截去原有滤棒长度,再接装新的滤嘴(滤棒长度 25 mm,接装纸长度 32 mm),若接装纸与滤棒之差 > 7 mm,则保留原有接装纸剩余 7 mm,然后接装新的滤嘴。

(3) 烟气指标检测:TPM、焦油、烟碱、水分分别按 GB/T 19609—2004《卷烟 用常规分析用吸烟机测定总粒相物和焦油》、GB/T 23355—2009《卷烟 总粒相物中烟碱的测定 气相色谱法》、GB/T 23203—2008《卷烟 总粒相物中水分的测定 第 1 部分:气相色谱法》执行。

1.2.3 数据处理 采用 SPSS 软件对试验数据进行相关性分析,利用回归方程分析卷烟阴燃完全性常规对烟气成分的影响。

2 结果与分析

2.1 实际可燃率与自由燃烧速度、可燃率之间的关系

不同牌号卷烟阴燃状况不同,所得实际可燃率、自由燃烧速度、可燃率结果不同。所测样品实际可燃率范围为 $83.025\% \sim 87.462\%$,平均为 85.63% ,变异系数为 1.12% ;自由燃烧速度范围为 $4.405\ 0 \sim 6.408\ 7$ mm/min,均值为 5.17 mm/min,变异系数为 9.55% ;可燃率范围为 $47.990\ 4 \sim 64.637\ 0$ mg/min,均值为 55.22 mg/min,变异系数 7.34% 。由变异系数可知中国常规卷烟的阴燃完全程度相差不大,燃烧速度有一定差别。

由表 1 可知,卷烟阴燃实际可燃率与自由燃烧速度在 0.01 水平呈显著负相关;与可燃率二者在 0.01 水平

表 1 实际可燃率与自由燃烧速度、可燃率相关性分析结果[†]

Table 1 Analysis results of correlation between actual flammability rate and free burning rate and flammability rate ($n=50$)

指标	实际可燃率	自由燃烧速度	可燃率
实际可燃率	1.00		
自由燃烧速度	-0.56 **	1.00	
可燃率	-0.53 **	0.93 **	1.00

[†] * *. 在 0.01 水平(双侧)上显著相关; *, 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

呈极显著负相关;自由燃烧速度与可燃率在 0.01 水平呈极显著正相关。卷烟阴燃程度受自由燃烧速度的影响,即燃烧速度慢,烟支阴燃越完全,残留的烟灰灰分越少。

2.2 卷烟阴燃完全性对烟气指标的影响

烟气指标检测结果显示不同牌号卷烟的常规烟气成

分释放量不同。TPM 变化范围为 11.18~16.72 mg,平均每支含量 14.15 mg;烟碱范围为 0.76~1.23 mg/支,平均每支含量 1.01 mg;焦油 8.95~13.46 mg/支,平均每支含量 11.16 mg;抽吸口数 5.16~7.11,平均每支含量 6.05 口;CO 含量变化范围为 10.45~13.87 mg/支,平均每支含量 12.05 mg。水分变异系数>20%,烟碱变异系数为 11.57,其他指标变异系数均<10%。

2.2.1 相关性结果分析 由表 2 可知,根据 Pearson 相关分析实际可燃率与 TPM、烟碱、焦油均是正相关关系,其中 TPM、焦油受影响程度大于烟碱;自由燃烧速度与 TPM、烟碱、焦油均呈负相关关系,其中 TPM、焦油与自由燃烧速度的相关较强;可燃率与 TPM、烟碱、焦油负相关,且对 TPM、焦油的影响最大。由分析结果知相关系数均<0.7,这是因为影响卷烟烟气成分含量的因素不仅仅有燃烧特性,不同卷烟的配方不同,卷烟烟气成分也会有差异。

表 2 燃烧指标与烟气指标相关性分析结果[†]

Table 2 Correlation analysis results between combustion index and smoke index ($n=50$)

燃烧指标	TPM	烟碱	水分	焦油	抽吸口数	CO	CO ₂
实际可燃率	0.68 **	0.56 **	0.27	0.67 **	0.45 **	0.11	0.2
自由燃烧速度	-0.61 **	-0.57 **	-0.10	-0.66 **	-0.48 **	-0.27	-0.41 **
可燃率	-0.64 **	-0.59 **	-0.17	-0.67 **	-0.55 **	-0.33 *	-0.46 **

[†] * *. 在 0.01 水平(双侧)上显著相关; *, 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

2.2.2 回归结果分析 以卷烟常规烟气指标为因变量,自由燃烧速度、实际可燃率、可燃率、烟支重量、烟支长度为自变量进行多元回归分析,方差分析结果可知除水分外,检测指标 TPM、焦油、抽吸口数、烟碱、CO、CO₂ 回归方程的 P 值均<0.01,说明预测模型能通过 0.01 水平的显著性检验。

由表 3 可知:① TPM 主要受自由燃烧速度、实际可燃率、烟支长度的影响,决定系数 R^2 为 0.620;TPM 与自由燃烧速度呈极显著负相关,与实际可燃率、烟支长度呈极显著正相关;由标准化回归系数可知,3 个自变量对 TPM 的影响顺序为实际可燃率>自由燃烧速度>烟支长度,即实际可燃率对 TPM 的影响最大。② 焦油和烟碱主要受自由燃烧速度、实际可燃率、烟支长度的影响,决定系数 R^2 分别为 0.66 和 0.50;焦油和烟碱与自由燃烧速度极显著负相关,与实际可燃率、烟支长度极显著正相关;影响顺序为自由燃烧速度>实际可燃率>烟支长度。③ 卷烟燃烧抽吸口数也受此三者的影响,决定系数为 0.71;抽吸口数与自由燃烧速度负相关,与实际可燃率、烟支长度呈正相关;烟支长度的影响最大,其次为自由燃烧速度和实际可燃率。④ CO、CO₂ 主要受自由燃烧速度和烟支长度呈的影响,决定系数分别为 0.15 和 0.55;二者与

自由燃烧速度呈负相关,与实际可燃率呈正相关,且自由燃烧速度的影响作用大于烟支长度。由以上分析可知,回归模型对检测的 50 种不同牌号卷烟的 TPM、焦油、烟碱、抽吸口数、CO₂ 指标的回归系数均>0.5,抽吸口数预测的决定系数最高为 0.71。

综合以上分析可以看出,卷烟阴燃完全性对常规烟气指标的影响一致,即卷烟阴燃越完全,常规烟气成分释放量越高。这是因为卷烟阴燃的完全性直接影响卷烟的自由燃烧速度,阴燃完全程度越高,卷烟的燃烧速度越慢,相应的抽吸口数就会增加,进而导致常规烟气成分释放量升高。卷烟的阴燃完全性是烟支燃烧时的质量损失率与初始烟丝质量的比率,故而还与卷烟燃烧烟灰残余量有关,卷烟阴燃越完全,相应的烟灰灰分越少,更多的燃烧物质挥发进入烟气,导致常规烟气成分释放量增加。

3 结论

(1) 50 种不同牌号中国卷烟燃烧完全性达 85.63%左右,自由燃烧速度约为 5.17 mm/min,达不到完全燃烧的状态。且卷烟越易燃,自由燃烧速度越快,燃烧越不完全。

(2) 卷烟燃烧完全程度对烟气中的 TPM、烟碱、焦油、抽吸口数均有不同程度的影响,且随着燃烧越完全,

表 3 多元回归分析结果
Table 3 Results of multiple regression analysis

参数	TPM			焦油			抽吸口数			烟碱		
	回归系数	标准化 回归系数	P 值	回归系数	标准化 回归系数	P 值	回归系数	标准化 回归系数	P 值	回归系数	标准化 回归系数	P 值
常数项	-44.56	—	0.00	-28.45	—	0.00	-12.49	—	0.01	-3.11	—	0.04
自由燃烧速度	-1.13	-0.47	0.00	-1.05	0.21	0.00	-0.66	-0.67	0.00	-1.12	-0.53	0.00
实际可燃率	0.61	0.49	0.00	0.41	0.10	0.00	0.12	0.24	0.02	0.04	0.34	0.01
烟支长度	0.15	0.31	0.00	0.12	0.04	0.00	0.14	0.73	0.00	0.02	0.33	0.01
决定系数		0.62			0.66			0.71			0.50	

参数	CO			CO ₂			水分					
	回归系数	标准化 回归系数	P 值	回归系数	标准化 回归系数	P 值	回归系数	标准化 回归系数	P 值			
常数项	6.44	—	0.12	4.54	—	0.54	-13.15	—	0.13	—	—	—
自由燃烧速度	-0.75	-0.41	0.01	-3.21	-0.70	0.00	0.05	0.05	0.80	—	—	—
实际可燃率	—	—	—	—	—	—	0.16	0.31	0.08	—	—	—
烟支长度	0.12	0.31	0.04	0.62	0.69	0.00	0.01	0.06	0.70	—	—	—
决定系数		0.15			0.55			0.08				

烟支燃烧产生的总颗粒物、焦油含量越高,相应的燃烧速度变慢,抽吸口数增加。

此研究的不足之处:① 按此方法所得得出的卷烟燃烧完全性,包含一部分碳化的燃烧锥,因此实际可燃率有一定偏差;② 卷烟阴燃与动态抽吸有一定差异,燃烧状态也有所不同,因此燃烧完全性也不尽相同。要解决以上问题,应尽可能模仿消费者抽烟模式,排除不完全燃烧燃烧锥的影响。

参考文献

[1] MEIER M W, SIEGMANN K. Significant reduction of carcinogenic compounds in tobacco smoke by the use of zeolite catalyst[J]. Micropr. Mesopr. Mater., 1999(33): 307-310.

[2] 卢昕博,戴路,张博,等. 卷烟纸技术研究进展[J/OL]. 中国造纸学报: 1-7. [2018-10-09]. [http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFQ&dbname=CJFD-LAST2018&filename=ZGZB201802012&uid=WEEvRec-wSIJHSlRa1FhdkJkVG1CTXc0WUtaSVhLVUJRO-GFEaWhRM0E3ST0=\\$9A4hF_YAuvQ5obgVAqNKPCYcEjKensW4IQMowHtwkF4VYPoHbKxJw!!&v=MTMzM-jBQeXJSYkxHNEg5bk1yWTlFWm9SOGVYMUxlFTN0RoMVQzcVRyV00xRnJDVVJMT2ZadVJ0Rnlublc3N04=](http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFQ&dbname=CJFD-LAST2018&filename=ZGZB201802012&uid=WEEvRec-wSIJHSlRa1FhdkJkVG1CTXc0WUtaSVhLVUJRO-GFEaWhRM0E3ST0=$9A4hF_YAuvQ5obgVAqNKPCYcEjKensW4IQMowHtwkF4VYPoHbKxJw!!&v=MTMzM-jBQeXJSYkxHNEg5bk1yWTlFWm9SOGVYMUxlFTN0RoMVQzcVRyV00xRnJDVVJMT2ZadVJ0Rnlublc3N04=).

[3] 荆雄,邢军,庞永强,等. 配方结构对低引燃倾向卷烟的影响[C]// 中国烟草学会学术年会. 南京: [出版者不详], 2012: 19-25.

[4] 吴宏伟,李丛民,田卫群. 某些盐类添加剂对降低卷烟焦油量的机理研究[J]. 烟草科技, 2000(11): 8-9.

[5] 王启成. 卷烟纸中助燃剂含量及比例对卷烟静燃速率的影响[J]. 中国造纸, 2015, 34(8): 73-74.

[6] 沈凯,戴路,李鸽志,等. 烟丝添加剂对卷烟燃烧温度和烟气成分的影响研究[J]. 化学世界, 2013, 54(7): 391-395, 448.

[7] 恽之瑜,徐杨,朱建华. 卷烟阴燃烟气中亚硝酸含量与其焦油和烟碱量的关连[J]. 常德师范学院学报:自然科学版, 2002(1): 39-43.

[8] 王宁. 卷烟纸燃烧度之测定[J]. 纸和造纸, 1993(2): 59.

[9] 赵继俊,张龙,高震宇,等. 卷烟阴燃速率测试系统的设计[J]. 数字技术与应用, 2013(6): 169-172.

[10] 沈慧,姚鹤鸣,鲍雪芬. 卷烟燃烧速度测定方法优化[C]// 上海烟草系统 2003 年度优秀学术论文集. 上海: [出版者不详], 2003: 74-79.

[11] 高震宇,冯茜,刘勇,等. 基于机器视觉的卷烟阴燃速率测试系统设计[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(3): 134-137.

[12] 颜水明. 气体扩散对卷烟燃吸温度分布及 CO 释放量的影响研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2015: 46-52.

[13] 黄维裴. 烟草和烟草制品一卷烟一自由燃烧速度的测定[J]. 烟草科技, 1981(2): 51-54.