



【摘要】本文首次用高分辨、快速纪录的红外热像仪AGEMA SC3000观察了卷烟抽吸时固相燃烧温度的变化。并通过比较不同类型烟叶的最高抽吸温度，探讨了燃烧温度和烟叶内在有机钾盐含量之间可能的关系。进一步在卷烟中加入几种常见的钾盐，也观察到抽吸最高温度的降低（除了 KH_2PO_4 ）。同时发现主流烟气中每口CO的输送量和抽吸最高温有一定的线性关系；但是在这个温度变化范围内，每毫克焦油中烟碱的含量观察不出明显的规律；同样在燃烧温度变化不大的情况下，由于实验误差的影响，稠环芳烃和燃烧温度的关系也没有一个明显的规律，但是燃烧温度变化较大时能发现高温时稠环芳烃的输送量比较高。

【关键词】红外热像仪
燃烧温度 卷烟 钾盐
主流烟气

卷烟燃烧温度和钾盐及烟气关系的探讨

郑赛晶 顾文博 张建平 刘百战

[上海烟草(集团)公司技术中心]

卷烟燃烧锥的温度是影响主、侧流烟气中化学成分及含量进而影响卷烟品质最基本的特性参数之一。它直接影响着燃烧锥后烟草成分的热解合成反应，影响了卷烟各种挥发、半挥发的成分向烟气中的输送量，也与烟气中有害成分的多少有很大的关联。因此精确测量卷烟燃烧温度、研究卷烟燃烧温度的影响因素，并对其进行调控以减小卷烟对吸烟者及环境的危害是一项比较重要的任务。但是由于卷烟内部烟丝分布的不均匀性和疏松的结构，导致温度分布很不规则，而且燃烧时气体流速很快，使得这方面的工作在早期有一定的难度^[1-7]，热电偶和早期的红外扫描技术由于分辨率比较低，记录速度慢，对于观察卷烟抽吸时的动态温度变化还是有些不足。近些年，红外热像仪的发展，弥补了上面的缺点^[8]。在本文中，我们首次使用高分辨的、快速纪录的AGEMA SC3000红外热像仪对卷烟燃烧温度进行了测量，初步研究了钾盐对卷烟燃烧温度的影响，以及由于卷烟燃烧温度变化而产生的可能的烟气变化规律。

1 实验部分

1.1 卷烟样品及其处理

单料卷烟的圆周约为24.5mm，长度为84mm，滤嘴长度20mm。实验前先进行重量和吸阻分选。

在单料卷烟中加添加剂时，是把各种钾盐分别溶于二次蒸馏水中，使钾离子的浓度为 0.004mol/L ，然后用微量注射器吸取50 μL 溶液均匀地注入每支烟中。各烟支在实验前先在温度 $22\pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度 $60\%\pm 2\%$ 条件下平衡2天。

1.2 卷烟燃烧锥表面发射率的确定

在红外测温中，发射率是一个非常重要的参数，它直接关系到测温结果的准确性。以前的文献中所报道的卷烟燃烧锥的红外发射率为 $0.92-0.98$ ^[6]，但是由于我们使用的AGEMA SC3000的敏感波长为 $8-9\mu\text{m}$ ，不同于以前的红外扫描仪($2-4\mu\text{m}$)，因此我们将此热像仪对卷烟燃烧锥的发射率进行重新矫正。

利用卷烟阴燃时气、固相温度保持平衡，采用自制的微小测温热电偶装置^[9]测出气相的温度作为红外热像仪所测到的某一小范围温度平均值的参考值，并按照下面的斯蒂芬-波尔兹曼定律来推算发射率。

$$M_g = \epsilon \sigma T_b^4 = \sigma T_g^4 \quad (\text{瓦/米}^2) \quad (1)$$

式中 σ 是斯蒂芬-波尔兹曼常数； ϵ 是发射率，描述在特定温度下物体的辐射力和黑体辐射力的比值。 ϵ 通常随波长和温度而变化，用热像仪获得的 ϵ 值是热像仪探测器敏感的红外波段内 $\epsilon\lambda$ 的平均值。

发射率的测量结果见表1：

表1 三种单料烟的红外发射率

Table.1 Emissivity of 3 types of cigarette

卷烟类型	发射率					平均值
	0.84	0.88	0.83	0.89	0.93	
烤烟	0.84	0.88	0.83	0.89	0.93	0.87
香料烟	0.85	0.86	0.86	0.86	0.90	0.87
白肋烟	0.90	0.83	0.90	0.87	0.92	0.88

从表1可以看出，这三种类型单料烟抽吸时燃烧锥发射率的测量结果在0.83~0.93之间，而且平均值为0.87-0.88，彼此之间无显著性差异。于是我们决定在实验中对各种卷烟测温时，发射率取相同的值0.88。

1.3 卷烟固相温度的测量

目前，我们建立的红外测温技术，仅用红外测温系统对第三口抽吸和阴燃的温度进行测量，此系统包括AGEMA SC3000红外热像仪（FLIR，美国）、一106 μm 近摄镜头（34mm*25mm/110mm）和一台附有内置抓图板的电脑（Windows XP）。SM400型20通道吸烟机（FILTRONA，英国）和RM1单通道吸烟机（BORGWALT，德国）用来进行卷烟的抽吸。整个红外测温系统的记录速度可以达到50HZ（0.02s记录一幅图）；热像仪的空间分辨率为1.1mrad，频谱范围为8-9 μm ，图形输出方式为14bit数码输出。热像仪和目标物的距离为0.100m，环境和大气温度都为 $22\pm 1^\circ\text{C}$ ，相对湿度为 $(60\pm 2)\%$ ，红外探头的测温范围选择在 300°C - 1500°C ，精确度为 $\pm 2^\circ\text{C}$ 。

1.4 烟气的分析

采用国标方法。

2 结果和讨论

2.1 卷烟抽吸时的温度

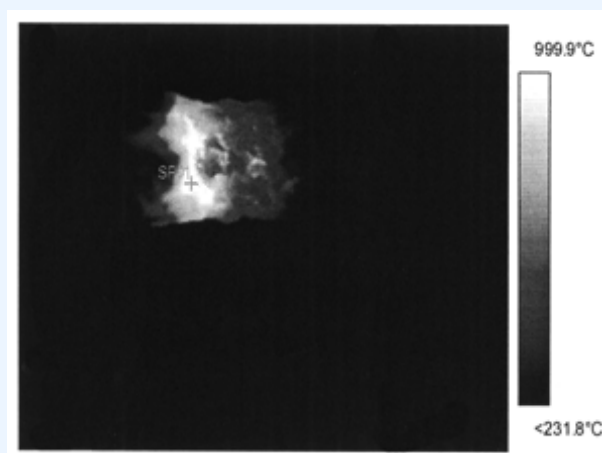


图1 卷烟抽吸过程中的红外图

Figure.1 Infrared thermal images for a 3rd puff smoked of burning cigarette under the ISO conditions (35mL/2s/60s)

图1是在标准抽吸条件下（35mL的抽吸容量下、抽吸时间为2s），红外热像仪拍到的卷烟燃烧锥某一时刻外围固相的温度分布图，越亮的部分表明温度越高。随着抽吸地进行，红外图也会迅速地产生变化。从图上可以读出任意一点的温度值，其中SP01为图中最高温度点。

图2是捕捉到的抽吸过程中每一幅热图中的最高温随抽吸时间的变化情况。从图中可见最高温曲线中间不是很平滑、有波动，温度的数值比以前报道的 900°C 高得多^[6]，

这是由于以前的仪器灵敏度较差，分辨率不高，因而捕捉不到卷烟燃烧时的高温点。从图中还可以发现最高温的曲线形状和抽吸曲线很相似。可见抽吸流速的变化，能改变单位时间内进入燃烧锥的空气，相应地改变了烟叶的燃烧状态，因而产生了不同的燃烧温度。

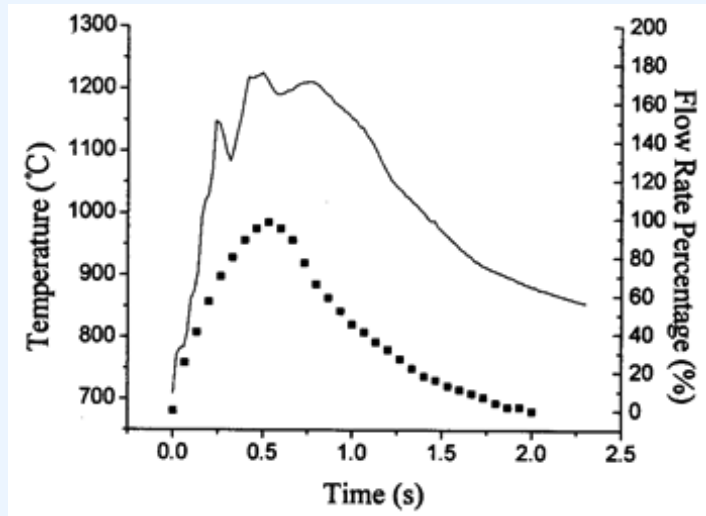


图2 抽吸最高温和时间的关系（—）以及2s内的抽吸曲线图（■）

Figure.2 Puff profiles(■) and the maximum temperature curves vs. puff time corresponding with the puff profiles(—)

由于烟支间的差异（比如填充度等）会影响氧气流分布，导致最高抽吸温度有比较大的差异。所以比较不同类型卷烟抽吸时燃烧温度的差异，还是得对其进行多次测量，取平均值。分别对同一种样烟的抽吸最高温进行了三个系列的测量实验，每个系列取十次测量数据。

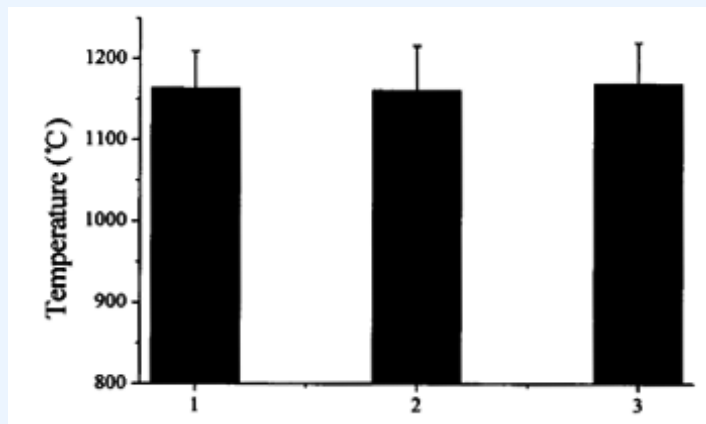


图3 抽吸最高温的十次平均平行结果（n为系列数）

Figure.3 10 times averaged results of maximum puff temperature.
"n" is the group number of experiment

从图3中可见，虽然每一系列中的十次测量结果由于烟支个体差异，导致其偏差较大，但是三次系列的平均值的大小重复性比较理想。因此下面的实验中抽吸最高温都是取十次平均的结果。

2.2 烟叶内在的钾盐对固相抽吸最高温的影响

上述红外测温方法建立以后，就可以方便地对不同类型卷烟（烤烟、香料烟和白肋烟）的固相最高温进行比较。

表2 不同类型单料烟燃烧温度和钾含量的比较

Tabl2.2 Potassium content and the maximum puff temperature of 3 kinds of single-tobacco-typed cigarette

卷烟类型	固相抽吸最高温 (°C)	K%	Cl%	SO4%	有机钾%	K/Cl
烤烟	1152	1.9	0.3	1.91	1.2	6.3
香料烟	1114	2.3	0.4	1.47	1.6	5.8
白肋烟	1107	4.1	0.3	1.80	3.4	13.7

从表2中可以看出，烤烟的燃烧温度比较高，香料烟和白肋烟的燃烧温度比较低。这可能是跟烟叶中K / Cl高的燃烧温度比较低有关。于是对烟丝进行了一些常规分析，确实发现白肋烟的K / Cl比较高，而烤烟的K / Cl比较低；但是香料烟K / Cl的值比烤烟还低，它的燃烧温度却比烤烟的低。于是我们认为燃烧温度也许还和其他阴、阳离子的含量有关，按照世界烟草科学合作中心“科技与烟气”学组提出的“有机钾”的概念(有机钾=钾的总量-(Cl离子+硫酸根离子))，认为只有与有机酸结合(NO₃⁻等除外)的钾才能对烟草的燃烧性产生积极促进的作用，从而降低卷烟的燃烧温度。于是我们对这几种烟草的总钾、氯离子、硫酸根离子的质量百分比进行了测量，并根据公式(2)进行了有机钾含量的计算，其中M_K、M_{Cl}、M_{SO4}分别为K、Cl、SO₄的摩尔质量。

$$\text{有机钾}\% = [K\% / M_K - (Cl\% / M_{Cl} + 0.5SO_4\% / M_{SO_4})] M_K \quad (2)$$

从表2可以看出烤烟的有机钾含量最低，而白肋烟的最高，正好说明了固相抽吸最高温的变化趋势。

2.3 外加钾盐对固相抽吸最高温的影响

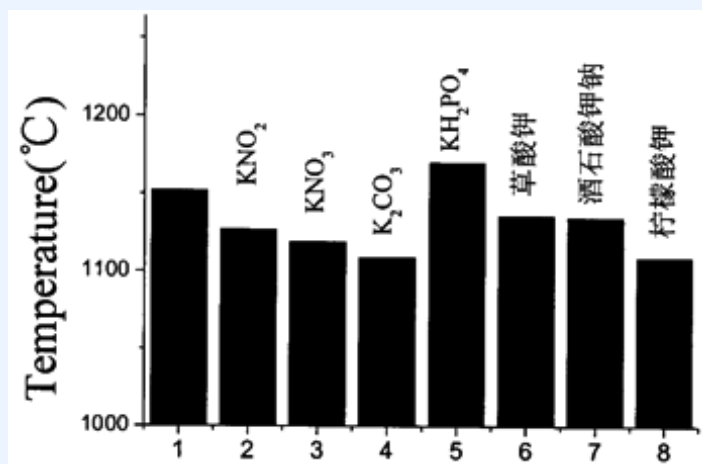


图4 加入钾盐后固相抽吸最高温的变化

Figure.4 The maximum puff temperature of flue cured-tobacco-typed cigarette with exogenous potassium salts

为了进一步观察钾盐对卷烟燃烧温度的影响，我们在辽宁烤烟中加入了各种钾盐(见图4和表3)，发现除了磷酸二氢钾，其它几种钾盐都能降低辽宁烤烟的燃烧温度，最大降幅约为50°C。

表3还列出了这几种卷烟的主流烟气结果分析。对其中的每口CO输送量和温度进行作图发现(见图5)，除了KNO₃和KNO₂以外，其它大部分烤烟加入钾盐添加剂后，每口CO输

送量和温度的变化比较一致,即随着温度的升高,CO的量也增加。它们之间的关系线性拟合曲线为 $Y=-4.36+0.005T$,相关系数为0.93。这可能是由于在高温氧化状态下不仅生成大量的CO和CO₂等气体,而且CO₂在氧化反应产生的大量热量下,和C发生急速地还原反应,使得CO的量更加增多。

而由于硝酸钾和亚硝酸钾在分解时放出O₂,额外增加的氧气有可能增加有机物向CO的转变,导致加入硝酸钾和亚硝酸钾后,虽然抽吸最高温降低了,但是每口CO含量增加。

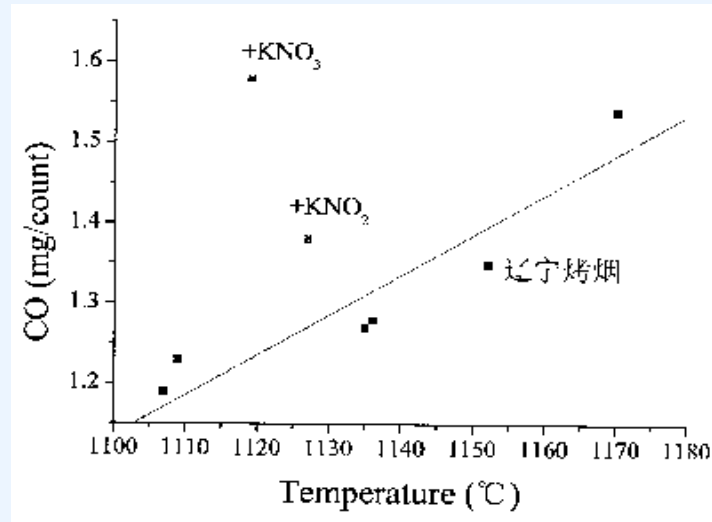


图5 烤烟加入各种钾盐后CO百分比浓度和抽吸最高温的关系

Figure.5 The relation between CO delivery and maximum puff temperature of flue cured-tobacco -typed cigarette with different exogenous potassium salts

每毫克焦油中烟碱的含量由于这个温度变化范围比较小,观察不出明显的线性规律。同样在燃烧温度变化不大的情况下,由于实验误差的影响,稠环芳烃和燃烧温度的关系没有一个明显的规律,但是比较燃烧温度变化最大的两种情况发现:在1170°C(辽宁烤烟分别加入K₂HPO₄)时,大部分稠环芳烃含量比较高,而1107°C(辽宁烤烟分别加入K₂CO₃)时比较低。这也符合前人在裂解实验中曾经发现的规律:裂解温度越高,稠环芳烃的量越多^[10]。不过更加精确的实验需要进一步扩大卷烟的燃烧温度范围来研究。

3 结论

卷烟燃烧是个快速的过程,红外热像仪由于其高分辨、高速纪录的特点,能够对卷烟燃烧锥外围固相的燃烧温度进行实时、动态地测量。虽然不同烟支由于多种因素的影响,其最高抽吸温度变化比较大,但是同一品种的不同烟支取十次测量结果的平均还是比较稳定的。

通过比较不同类型烟叶的最高抽吸温度,发现白肋烟的温度最低而烤烟的温度最高,并认为可能有机酸钾含量是导致这个差异的一个重要因素。

在烤烟中加入几种常见的钾盐,也观察到抽吸最高温度的降低。而且温度降低时,可能会使得烟气中每口CO降低,每mg焦油中稠环芳烃的含量在温度降低比较厉害时可能也会有所降低。

参考文献:

1. Touey, G. P., Mumpower, R. C., Measurement of the combustion-zone

- temperature of cigarettes. *Tob. Sci.*, 1957, 1:33-37
2. Muramatsu, M., Obi, Y., Fukuzumi, T., et al. Influence of continuous puff velocity on combustion rate, temperature and temperature distribution of cigarette. *J. Agric. Chem. Soc. Japan*, 1972, 46:569-575
3. Egerton, Sir A., Gagan, K., Weinberg, F., J., The mechanism of smouldering in cigarette. *Combust. Flame*, 1963, 7:63-78
4. Baker, R. R., Temperature distribution inside a burning cigarette. *Nature*, 1974, 247:405-406
5. Baker, R. R., Temperature variation within a cigarette combustion coal during the smoking cycle. *High Temp. Sci.*, 1975, 7:236-247
6. Laszlo, T. S., Wataon, F. M., A scanning infrared technique for cigarette coal peak temperature measurements. *Beitr. Tabakforsch.*, 1974, 7:269-275
7. Laszlo, T. S., lendvay, A. T., Cigarette peak coal temperature measurements. *Beitr. Tabakforsch.*, 1974, 7:276-281
8. Liu, C., Woodcock, D., Observing the peripheral burning of cigarettes by an infrared technique. *Beitr. Tabakforsch.*, 2002, 20:257-264
9. Wu Jumin The fast miniature thermocouple. Patent of China:200420114253. 3. 吴菊民. 超细测温热电偶 [p]. 中国专利:200420114253. 3
10. Horne, P. A., Williams, P. T., *Fuel* 75(1996) 1051

The Relation between Temperature of Burning Cigarette
and Potassium Salts & Mainstream Smoke

ZHENG Saijing GU Wenbo ZHANG Jianping LIU Baizhan
The Technical Center of Shanghai Tobacco (group)
Company, Shanghai, 200082, China

Abstract:

A modern infrared camera AGEMA SC3000 was used to observe the peripheral solid-phase temperature of cigarette. The trend of maximum temperature with the puff time was made. Although the maximum puff temperature trend was fluctuant with the transient burning events occurring, it was basically accordant to the trend of air influx. The maximum puff temperature averaged from 10 repeating measurements was stable. The maximum puff temperature of burley-tobacco-typed cigarette was lowest with the highest content of organic potassium salts among three kinds of single-tobacco-typed cigarette. When exogenous potassium salts except KH_2PO_4 were added to the flue cured-tobacco-typed cigarette, the decrease of the maximum puff temperature could also be observed. The CO delivery in mainstream smoke increased with the increasing of maximum puff temperature. It was also observed that the higher temperature was, the much polyaromatic hydrocarbons in unit tar would be released.

Keywords: infrared camera, burning temperature, cigarette, potassium

salt,MS smoke

【点 评】

利用红外热像仪，建立卷烟燃烧温度的测量技术，尚属国内首次。本研究探索了燃烧温度与添加钾盐之间的关系，结论具有一定的启发性。本研究抓住了卷烟降害的关键方向，对我公司今后低危害卷烟的开发，提供了重要的测试手段，初步提出了一些降害技术的研究方向。技术先进，讨论深入，论文书写规范。 (烟草化学专业组)

【打印】 【关闭】