

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2314961

卷烟加热棒测温仪的设计和不确定度分析

程东旭¹ 王瑞珍¹ 周君洋² 张凯² 张鹏飞³(1.河南中烟工业有限责任公司 郑州 450000; 2.中国计量大学计量测试工程学院 杭州 310018;
3.中国烟草总公司郑州烟草研究院 郑州 450001)

摘要: 针对烟草行业,目前尚未存在检测加热卷烟烟具加热温度及温度均匀性的检测装置和方法,为了解决在狭小空间内对微型棒状加热片的测温需求,本文研制了一种卷烟加热棒测温仪,并设计了一种适用于卷烟加热棒测温的新型结构。为了验证卷烟加热棒测温仪测量结果的准确性与可靠性,对测温仪进行不确定度分析。分析结果依据《GB/T 13283-2008 工业过程测量和控制用检测仪表和显示仪表精确度等级》标准,在量程为 100 °C~400 °C,满足 0.1 级要求。最后实验验证可以有效测量不同烟支的加热温度场情况。

关键词: 电磁加热烟具;卷烟加热棒测温仪;测温结构设计;不确定度分析

中图分类号: TB942 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Design and measurement uncertainty analysis of cigarette heating rod thermometer

Cheng Dongxu¹ Wang Ruizhen¹ Zhou Junyang² Zhang Kai² Zhang Pengfei³

(1. China Tobacco Henan Industrial Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China; 2. China Jiliang University, Hangzhou 310018, China; 3. Zhengzhou Tobacco Research Institute of CNTC, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: For the tobacco industry, there is currently no detection device and method for detecting the heating temperature and temperature uniformity of heated cigarette smoking sets. In order to solve the temperature measurement needs of micro rod-shaped heating sheets in a narrow space, this article developed a cigarette heating rod thermometer, and designed a new structure suitable for temperature measurement of cigarette heating rods. In order to verify the accuracy and reliability of the measurement results of the cigarette heating rod thermometer, uncertainty analysis of the thermometer was performed. The analysis results are based on the "GB/T 13283-2008 Accuracy Level of Detection Instruments and Display Instruments for Industrial Process Measurement and Control" standard. The measurement range is 100 °C~400 °C, meeting the requirements of level 0.1. The final experiment verified that the heating temperature field of different cigarettes can be effectively measured.

Keywords: electromagnetic heating smoking set; cigarette heating rod thermometer; temperature measurement structure design; uncertainty analysis

0 引言

近年来,随着全球控烟环境的日趋严峻和消费者对健康的日益关注,加热卷烟烟草制品发展迅猛^[1]。加热不燃烧卷烟(heat not burn, HNB)也称为加热卷烟,它是利用外部热源加热烟草而非点燃烟草产生可吸入气溶胶的一种烟草制品。与常规卷烟不同,加热卷烟加热温度远低于燃烧温度,可以有效地减少烟草在高温燃烧产生的有害成分,如焦油、一氧化碳、酮类、醛类、重金属等,从而降低对人体健康的危害。研究表明,烟草烟气有害成分释放量与加热、燃

烧温度密切相关,降低加热或燃烧温度可显著降低烟气有害成分释放量^[2-3]。在满足消费者烟草特征感受的同时,降低烟气有害成分释放量^[4],减少对消费者的危害,是具有“加热烟草而非燃烧烟草”特征的新型卷烟设计研发的出发点。新型卷烟在生理感受、心理感知、吸食方式等方面最接近传统卷烟,并具有明显的减害特征,吸烟者摄入的有害物质种类和摄入量大幅度下降,具有很好的发展潜力。

目前市面主流的加热卷烟主要采用电加热型的低温加热方式。通过加热装置对烟丝或含有烟碱的雾化液进行加热雾化产生可供吸食的烟气。在加热方式上,大部分产品

都采用了中心加热,将加热棒插入烟支内部对烟支进行加热^[5]。其中加热温度是影响加热卷烟烟气特性和感官质量的重要因素。

其中,魏信建等^[6-7]采用红外热像仪非接触测温方法测量加热卷烟棒的温度情况,但是其精度较低,且红外测温仪与加热棒之间不能有阻碍,无法应用在采用电磁感应式加热的烟具上。牛淑洁等^[8]采用将热电偶传感器直接贴合在加热元件上测温,测量精度较高,但是由于是手工贴合,无法保证重复性以及大批量的电加热烟支进行快速测试。

为了解决目前行业内卷烟加热棒加热温度依赖厂家提供、厂家以功率计算温度,没有检测加热卷烟烟具加热棒升温时间及温度分布的检测方法和相应装置。研制了卷烟加热棒测温仪,设计了一套具有高弹性、高抗干扰能力、高重复性和预紧力一致的测温装置结构,其结构上模拟了烟支插入的情况,可以满足对单个烟支加热棒进行 4 个方向上的长时间的温度测量,以此来评估卷烟烟具的升温时间及温度均匀性。且为了提高设备的集成度,设计了一套高度集成化的方案。为了保证测量结果的准确性,本文并对该卷烟加热棒测温仪的测量不确定度进行了分析,并对两款同品牌不同型号的烟支进行了实测。最后分析证明,该方法可得到较为准确的温度测量值。

1 卷烟加热棒测温仪设计

1.1 卷烟加热棒测温仪整体方案设计

烟具加热棒测温仪的整体方案设计主要由电控箱、工控平板、温度采集模块组成,实物如图 1 所示。其中电控箱的具体结构包括平板控制面板、提手面板、外设接口面板、电源接口面板、底座面板和内部采集腔。平板控制面板为固定工控平板的面板,工控平板负责连接控制连接温度采集模块,处理显示采集数据;提手面板提供提手装置,方便移动测温仪;底座面板钻有定位的螺纹孔,用于固定测温模块;内部采集腔内固定电源线、转接线、采集线以及采集卡,起到保护线路作用,使功能更为集成化。

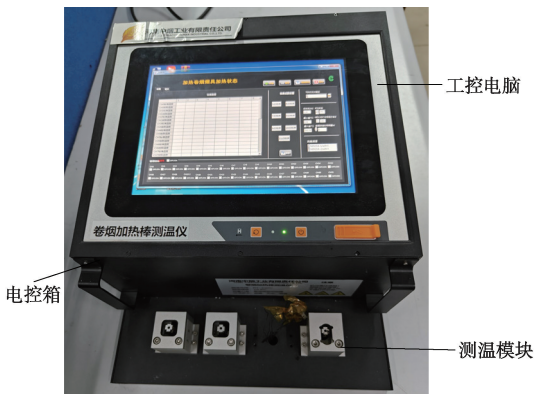
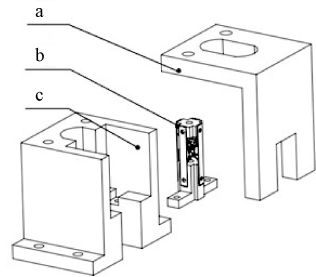


图 1 烟具加热棒测温仪实物图

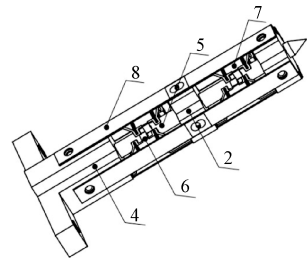
1.2 卷烟加热棒测温仪测温方案设计

卷烟加热棒测温仪的测温装置结构设计如图 2 所示,测温装置结构主要分为 3 部分:L 型盖面、固定底座和中央测温结构。L 形盖面和固定底座材质为耐高温、可加工、高隔热的特殊铝合金板材,用于对被测烟具进行限位固定,并隔绝烟具加热棒的温度散失。中央测温结构的具体结构图如图 3 所示,由固定用十字件,双层弹性梁和铂电阻组成,固定用十字件分为上下两部分,材质与上述 L 形盖面和固定底座材质一样为特殊铝合金板材,用于固定 4 个方向上的双层弹性梁。双层弹性梁为铍青铜合金材料,其中间设计有抱耳结构的铂电阻卡位槽用于固定铂电阻,上下两侧的弹性结构设计可以有效的将铂电阻紧压至中间的卷烟加热棒上,以此来测量该烟具加热棒的温度。



a-L 形盖面;b-中央测温结构;c-固定底座

图 2 测温装置结构图



2-上盘十字件;4-下盘十字件;5-烟具加热棒;6、7-铂电阻;

8-双层弹性梁

图 3 中央测温结构图

使用时将铂电阻用高温绝缘胶固定在铂电阻卡位槽中。最后,将铂电阻连接至高精度温度采集卡,进行温度采集数据的处理和显示,测量原理图如图 4 所示。

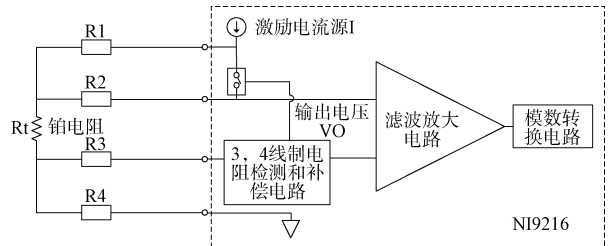


图 4 测量原理图

高精度采集卡的型号为 NI-9216,其具体参数如表 1 所示。其中,所采用的铂电阻根据项目被测对象烟具加热空

间特征,选择四线制薄膜铂电阻作为传感器,四线制铂电阻可以有有效的消除测量铂电阻的导线误差,测量原理如下式:

$$R_t = \frac{V_o}{I} \quad (1)$$

式中: R_t 为铂电阻在温度为 t 时的阻值, V_o 为铂电阻上电压, I 为激励电流。

电阻与温度之间关系为:

$$R_t = R_{t_0}[1 + \alpha(t - t_0)] \quad (2)$$

式中: R_{t_0} 为铂电阻在温度为 0°C 时的阻值, α 为温度系数。

表1 NI-9216 温度采集卡参数

通道	16
最大采样率	400 Sa/s
测量精度	0.15 $^\circ\text{C}$
支持传感器	PT100RTD

薄膜铂电阻参数如表2所示。

表2 薄膜铂电阻参数

测温范围	$-70^\circ\text{C} \sim +500^\circ\text{C}$
电阻值	100 Ω 在 0°C 时
温度系数	0.003 851
精度等级	F 0.10 (Class B1/3) $0^\circ\text{C} \sim +400^\circ\text{C}$
元件尺寸	2.3 mm \times 2.0 mm \times 0.9 mm (长 \times 宽 \times 厚)

2 卷烟加热棒测温仪不确定度分析

2.1 实验设计

为了评价卷烟加热棒测温仪的测量重复性,采用FLUKE高精度干井炉对温度检测单元进行测量重复性实验,该干井炉的参数如表3所示,实验选取3号测温单元上方铂电阻传感器进行实验,将实验测温单元的中央测温结构插入恒温槽中,其示意图如图5所示,根据卷烟加热棒测温仪在实际使用时的温度情况。取温度点 100°C 、 150°C 、 200°C 、 250°C 、 300°C 、 350°C 、 400°C 进行实验。待恒温槽温稳定后每30 s读取一次被检值并记录,重复读数10次,实验装置如图6所示。

2.2 测量模型

根据被测量与其依赖量的关系建立卷烟加热棒测温仪的测试结果不确定度的数学模型^[9],建立数学模型为:

$$\Delta t_i = t_s - t_i \quad (3)$$

式中: Δt_i 为标准值与测量值的误差值, t_s 为干井炉设定温, t_i 为被测卷烟加热棒测温仪每次实验测量的温度。具体检定实验数据如表4所示。

2.3 不确定度来源分析

根据卷烟加热棒测温仪测量重复性实验过程可知,不确定度的来源主要为卷烟加热棒测温仪测量重复性和干井炉温度不均匀性和波动性,以及温度采集卡测量精度。

表3 FLUKE 9172 高精度干井炉参数

工作范围	$35^\circ\text{C} \sim 425^\circ\text{C}$
准确性	$\pm 0.1^\circ\text{C}$: $35^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$ $\pm 0.15^\circ\text{C}$: $100^\circ\text{C} \sim 225^\circ\text{C}$ $\pm 0.2^\circ\text{C}$: $225^\circ\text{C} \sim 425^\circ\text{C}$
稳定性	$\pm 0.005^\circ\text{C}$: $35^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$ $\pm 0.008^\circ\text{C}$: $100^\circ\text{C} \sim 225^\circ\text{C}$ $\pm 0.01^\circ\text{C}$: $225^\circ\text{C} \sim 425^\circ\text{C}$ $\pm 0.05^\circ\text{C}$: $35^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$
轴向不均匀性	$\pm 0.1^\circ\text{C}$: $100^\circ\text{C} \sim 225^\circ\text{C}$ $\pm 0.2^\circ\text{C}$: $225^\circ\text{C} \sim 425^\circ\text{C}$ $\pm 0.01^\circ\text{C}$: $35^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$
径向不均匀性	$\pm 0.02^\circ\text{C}$: $100^\circ\text{C} \sim 225^\circ\text{C}$ $\pm 0.025^\circ\text{C}$: $225^\circ\text{C} \sim 425^\circ\text{C}$

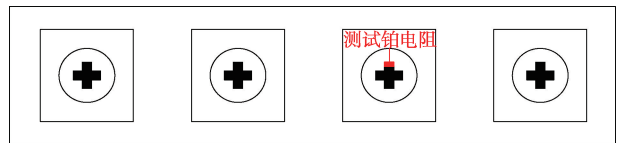


图5 实验铂电阻传感器位置示意图



图6 实验装置图

检定结果不确定度具体来源为以下6点^[10]:1)卷烟加热棒测温仪测量重复性引入的不确定度分量;2)由温度采集卡测量精度引入的不确定度分量;3)干井炉温度不准确引入的不确定度分量;4)干井炉温度波动性引入的不确定度分量;5)干井炉轴向温度不均匀性引入的不确定度分量;6)干井炉径向温度不均匀性引入的不确定度分量;卷烟加热棒测温仪不确定度分量如表5所示。

2.4 A类标准不确定度分析

依据JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》,对重复性实验结果进行不确定度分析。由贝塞尔法评定A类标准不确定度计算公式如下,单次检测的温度的标准差 $s(x)$ 为:

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (4)$$

式中: x_i 为每次测量温度测试数据, \bar{x} 为所有测量数据平均值,单位为 $^\circ\text{C}$, n 为检测次数,A类不确定度 $u_{A1}(x)$ 为:

表 4 检定实验结果

$t_s \backslash t_i$	100	150	200	250	300	350	400
1	100.019 7	149.989 3	199.998 5	249.989 0	300.088 8	350.104 8	399.998 0
2	100.046 3	150.026 0	200.032 6	250.016 9	300.031 3	350.057 3	400.152 3
3	100.038 5	150.032 8	200.046 7	249.985 6	299.767 4	349.903 0	400.086 5
4	100.040 2	149.996 9	200.151 7	249.965 2	299.726 8	349.598 5	399.954 2
5	100.051 7	150.003 6	200.078 1	249.989 5	299.650 8	349.705 2	399.640 1
6	100.042 6	150.002 2	200.002 8	250.076 5	299.864 1	349.702 6	399.743 7
7	100.038 2	150.029 1	200.027 7	250.000 1	299.859 3	349.570 2	399.499 4
8	100.063 2	150.019 8	200.035 5	249.937 8	299.917 1	349.536 8	399.734 8
9	100.071 7	150.039 1	200.032 7	249.863 5	299.813 2	349.596 5	399.582 0
10	100.071 1	150.066 2	200.030 5	249.893 1	300.003 0	349.717 6	399.541 4

表 5 卷烟加热棒测温仪不确定度分量

序号	不确定度来源	不确定度分量符号	不确定度评定方法类型
1	卷烟加热棒测温仪测量重复性	u_{A1}	A 类
2	温度采集卡测量精度	u_{B1}	B 类
3	干井炉温度不准确度	u_{B2}	B 类
4	干井炉温度波动性	u_{B3}	B 类
5	干井炉轴向温度不均匀性	u_{B4}	B 类
6	干井炉径向温度不均匀性	u_{B5}	B 类

$$u_{A1}(x) = s(x) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

根据实验数据计算得出装置检测的 A 类不确定度的评定结果 $u_{A1}(x)$ 如表 6 所示。

2.5 合成不确定度的分析

B 类标准不确定度通过非统计方法进行评定,通过获取检测输入量的先验信息,对输入量引入的不确定度进行计算,B 类标准不确定度用 u_{Bi} 表示。其计算公式为:

$$u_{Bi} = \frac{a_i}{k} \quad (6)$$

表 6 卷烟加热棒测温仪不确定度分量

测试温度点/°C	u_{A1}	u_{B1}	u_{B2}	u_{B3}	u_{B4}	u_{B5}
100	0.015 9	0.086 6	0.057 7	0.002 8	0.028 8	0.005 7
150	0.024 7	0.086 6	0.086 6	0.004 6	0.057 7	0.011 5
200	0.041 6	0.086 6	0.086 6	0.004 6	0.057 7	0.011 5
250	0.070 8	0.086 6	0.115 4	0.005 7	0.115 4	0.014 4
300	0.135 3	0.086 6	0.115 4	0.005 7	0.115 4	0.014 4
350	0.204 6	0.086 6	0.115 4	0.005 7	0.115 4	0.014 4
400	0.226 8	0.086 6	0.115 4	0.005 7	0.115 4	0.014 4

式中: a_i 为被测量可能的半区间宽度, k 为置信因子,按均匀分布,取置信因子 $k = \sqrt{3}$ 。

根据干井炉参数计算得出 B 类不确定度的评定结果 u_{Bi} 如表 6 所示。

当检测结果为若干个其他量求得时,合成不确定度是通过各量的方差和协方差运算得出的。合成标准不确定度用符号 u_c 表示,若检测结果 y 与各个分量 $(x_1, x_2, x_3, \dots, x^n)$ 之间满足 $y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x^n)$,且各个分量均独立,则合成不确定度计算公式为:

$$u_{c1}^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right) u^2(x_i) = \sum_{i=1}^n c_i^2 u^2(x_i) \quad (7)$$

$$u_{c1} = \sqrt{\sum u_i^2} \quad (8)$$

式中: u_i 为合成标准不确定度 u_c 的一个分量,等于 x_i 的标准不确定 u_i 乘以灵敏系数 c_i ,灵敏系数 c_i 计算公式为^[11]:

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad (9)$$

$$c_1 = \frac{\partial f}{\partial t_i} = -1 \quad (10)$$

$$c_2 = \frac{\partial f}{\partial t_s} = 1 \quad (11)$$

根据上述计算的灵敏系数及各不确定度分量确定合成不确定度 u_{c1} 的计算公式为:

$$u_{c1} = \sqrt{c_1^2 \max(u_{A1}, u_{B1})^2 + c_2^2 u_{B2}^2 + c_2^2 u_{B3}^2 + c_2^2 u_{B4}^2 + c_2^2 u_{B5}^2} \quad (12)$$

式中:在每个温度点取 u_{A1} 和 u_{B1} 中较大者应用在合成标准不确定度的计算。

扩展不确定度是合成不确定度与包含因子的乘积,其结

果表示检测结果的不确定度,扩展不确定度用符号 u_{p1} 表示。

$$u_{p1} = k_{p1} \times u_{c1} \quad (13)$$

式中: k_{p1} 为包含因子,按置信区间 95%,取 $k_{p1}=2$ 。

由式(11)、(12)计算得出装置检测结果的扩展不确定度 u_{p1} 如表 7 所示。

表 7 扩展不确定度评定表

测试温度点/℃	100	150	200	250	300	350	400
扩展不确定度 u_{p1} /℃	0.216 3	0.271 8	0.271 8	0.370 8	0.425 4	0.524 5	0.559 9

2.6 引用误差分析

引用误差是对于仪表满量程的一种误差,即测量的绝对误差与仪表的满量程值之比,称为仪表的引用误差,它常以百分数表示。具体计算公式为:

$$\gamma = \frac{x-a}{R} \times 100\% \quad (14)$$

式中: γ 为引用误差, x 为测量值, R 为量程范围, a 为真

值,真值近似由于干井炉所设定温度代替。

由式(14)计算的出检测卷烟加热棒测温仪各点位温度下的引用误差取最大值,具体数值由表 8 所示。

依据《GB/T 13283-2008 工业过程测量和控制用检测仪表和显示仪表精确度等级》标准,在量程为 100℃~400℃,可以计算得该卷烟加热棒测温仪的最大引用误差为 0.050 7,满足 0.1 级要求。

表 8 引用误差

测试温度点/℃	100	150	200	250	300	350	400
引用误差 γ /℃	0.023 9	0.022 1	0.050 5	0.025 5	0.029 6	0.034 9	0.050 7

3 实际测试

将设备进行标定校准后,对某品牌的两种不同型号烟支加热棒(A型,B型)在满电情况下测量其一个加热周期,烟支如图 7 所示,测试环境照片如图 8 所示。每隔 1 s,记



图 7 烟支照片

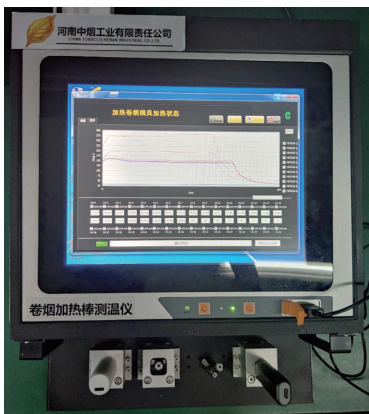


图 8 测试照片

录 1 次各方向上温度传感器的测量值,整个实验持续时间为 120 s。测试结果如图 9 所示。

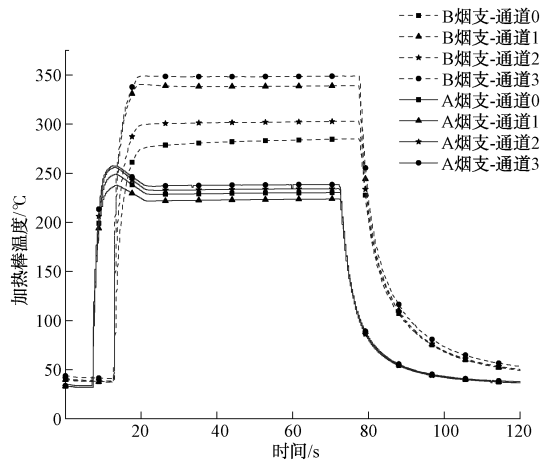


图 9 测试结果

经测试结果表明,A烟支在温度分布方面表现更为均匀,但峰值温度较低;相反,B烟支的温度分布较不均匀,但其峰值温度较高。此外,本文还能获知这两种烟支的升温时间和恒温时间。根据实验结果,可以确定该卷烟加热棒测温仪能够准确地测量不同烟支加热棒的温度分布,且具有高度的准确性和可靠性,其能够精准地捕捉并记录不同烟支加热棒的温度分布情况。

4 结 论

为满足狭窄空间对烟具加热棒进行测温需求,设计了

一种可以满足在狭窄空间对烟具加热棒进行测温的结构,并基于该结构设计了卷烟加热棒测温仪。为了验证卷烟加热棒测温仪的有效性和准确性,对卷烟加热棒测温仪的不确定度等因素进行了分析和计算。最后,通过不确定度的合成,得到了卷烟加热棒测温仪的扩展不确定度,并根据不同温度点的数据计算其引用误差,得到其精度等级满足 0.1 级要求。并对某品牌不同型号烟支进行了测试,最终测试结果表明该卷烟加热棒测温仪的测量结果较为可靠。可为电加热不燃烧型卷烟烟具在传热机理分析、温度精准控制和能耗优化管理等方面的提升与设计提供理论与实验支持^[12-15],从而进一步推动国内电磁感应加热卷烟产品研发与应用的进程。

参考文献

- [1] 李磊,周宁波,屈湘辉. 新型烟草制品市场发展及法律监管[J]. 中国烟草学报,2018,24(2):100-110.
- [2] 崔华鹏,陈黎,樊美娟,等. 加热温度对加热卷烟气溶胶物理特性的影响[J]. 烟草科技,2022,55(4):36-41.
- [3] 何红梅,尤晓娟,刘献军,等. 8 种中心电加热卷烟烟气释放特性分析[J]. 食品与机械,2021,37(11):44-49.
- [4] 卢乐华,高洁,费菲,等. 不同工艺电加热卷烟再造烟叶主要成分的释放性能[J]. 烟草科技,2023,56(3):30-40,77.
- [5] 陈一桢,高颂,彭瑞,等. 提高加热不燃烧卷烟专用薄片导热特性的研究[J]. 中国造纸,2022,41(1):50-55.
- [6] 魏信建,邹金慧,郑绪东,等. 加热型卷烟烟具加热器温度场分布数值模拟[J]. 电子测量技术,2020,43(17):1-6.
- [7] 唐伟,陈昆,陈佳琦,等. 基于热流分析法的加热卷烟烟具能耗控制研究[J]. 轻工学报,2023,38(3):119-126.
- [8] 牛淑洁,郑绪东,刘美琦,等. 烟支密度对周向加热新型卷烟烟具加热特性影响研究[J]. 电子测量技术,2018,41(24):7-11.
- [9] 赵丹丹,周林峰,李永招,等. 快速核酸检测仪温度偏差的测量不确定度分析[J]. 计量与测试技术,2023,50(3):106-108,111.
- [10] 魏明明,金锐,闻春华,等. 温湿度传感器校准结果的不确定度分析与评定[J]. 电子测量技术,2018,41(8):35-41.
- [11] 张佳佳,刘宇,关彦华,等. 机械式温湿度计检定结果温度部分的不确定度评定[J]. 国外电子测量技术,2019,38(4):140-143.
- [12] 尚善斋. 电加热不燃烧卷烟提质增效关键技术研究与应用[R]. 云南中烟工业有限责任公司技术中心,2020.
- [13] 陈永宽. 电加热新型卷烟专用烟支设计与开发[R]. 云南中烟工业有限责任公司技术中心,2017.
- [14] 于涛. 电子烟烟具加热雾化技术研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2018.
- [15] 张骥,张振涛,杨俊玲,等. 加热不燃烧烟草制品研究现状和未来展望[J]. 科技与创新,2020(15):11-15.

作者简介

程东旭,硕士,工程师,主要研究方向为烟草计量。

E-mail: cchhddxx@163.com

张鹏飞(通信作者),硕士,工程师,主要研究方向为是烟草测量、流量测量、智能仪器开发。

E-mail: yczhangpf@163.com