

加热卷烟烟具加热片温度均匀性检测方法应用



李博¹, 王海滨¹, 杨宗良², 张凯^{2,*}

¹河南中烟工业有限责任公司, 河南郑州 450000

²中国计量大学计量测试与仪器学院, 浙江杭州 310018

摘要: 加热卷烟的温度对于确保烟气特性的稳定性和吸烟者的体验至关重要, 然而烟具加热片小巧, 结构精密, 测量难度大。为了准确测量不同加热卷烟的温度控制效果, 本研究旨在解决这一问题, 通过比较不同的传热方式, 设计并验证了一款具有高适用性、良好重复性和耐高温性能的烟具加热片测温仪。该装置充分考虑了烟具加热片结构的特殊性, 采用了高精度的多通道温度检测设备, 并利用高精度干井炉进行了量值溯源, 以确保测量的准确性和可靠性。实验结果表明, 所设计的测温仪具有优良的梯度稳定性以及高达 $\pm 1^\circ\text{C}$ 的重复性。进一步探索了该装置在实际应用中的可行性, 发现其能够实现多点多组测温, 在满足烟具加热片的温度分布测量需求的同时, 能够准确地捕捉加热卷烟的温度分布情况。此外, 该装置的耐高温性能、高重复性和高稳定性使其成为加热卷烟工艺优化的重要工具。通过提高加热卷烟的质量和降低研发成本, 该装置将为行业的技术进步和经济效益做出重要贡献。本研究的成果对加热卷烟行业的技术进步和产业发展具有重要意义。

关键词: 加热卷烟; 热传递; 温度均匀性; 测量设备研制与检测

DOI: [10.57237/j.jest.2024.02.001](https://doi.org/10.57237/j.jest.2024.02.001)

Application of Heating Uniformity Detection Method for Heating Blade Temperature of Tobacco Products

Li Bo¹, Wang Haibin¹, Yang Zongliang², Zhang Kai^{2,*}

¹China Tobacco Henan Industrial Co., Ltd., Zhengzhou 45000, China

²College of Metrology Measurement and Instrument, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China

Abstract: Measuring the temperature of heated cigarettes is crucial for ensuring consistent smoke characteristics and a satisfactory smoking experience. This study addresses the challenge of measuring temperature in small, sophisticated devices by creating a high-applicability, highly repeatable, and heat-resistant thermometer for cigarette heating elements. The device takes into account the distinctive structure of heating elements and uses high-precision equipment for multi-channel temperature detection. It also employs dry well furnaces for traceability, ensuring accurate and reliable measurement. Experimental results have shown that the thermometer has excellent gradient stability and up to $\pm 1^\circ\text{C}$ repeatability. Additionally, the device can perform multi-point multi-group temperature measurements, enabling it to accurately capture the temperature distribution within heated cigarettes. The device's heat resistance, repeatability, and stability make it an essential tool for optimizing heated cigarette processes. Its ability to improve the quality of heated

*通信作者: 张凯, zkzb3026@cjl.u.edu.cn

cigarettes and reduce development costs significantly contributes to the industry's technological progress and economic benefits. This study has significant implications for the technical advancement and industrial development of the heated cigarette industry.

Keywords: Heating-type Cigarettes; Heat Transfer; Temperature Uniformity; The Development and Testing of Measurement Equipment

1 引言

加热卷烟（Heated Tobacco Product, HTP）是一种新型烟草制品，其特点是加热不燃烧，降低有害物质的生成，在控烟政策收紧的环境中受到关注并迅速发展[1-5]。电加热卷烟主要通过电阻或电磁感应方式加热烟叶，被视为更健康的吸烟方式。相关理论包括麦克斯韦方程组、焦耳定律和傅里叶导热定律等[6-10]。

在经济社会的快速增长和生活水平的显著提升背景下，烟草行业将重心转向如电子烟、加热卷烟及无烟气烟草制品等创新产品的开发[11, 12]。其中，加热卷烟作为研究重点，其温度控制、吸烟方式以及滤嘴过滤效果等因素对烟气释放特性的作用备受考察[13-15]。受烟芯材料以及滤嘴段温度调控的影响，加

热卷烟的品质，从烟气成分、气温到吸烟者的感受上都体现出来。因此，为了分析加热卷烟的传热特性，需要对烟芯、滤嘴，以及烟具表面等关键位置的温度变化进行实时监测，从而真实地反映卷烟的传热过程。

2 系统总体设计方案

该系统整体设计方案包括铂电阻的选择、电控箱的设计、上位机软件的开发以及检测部件的设计等。技术路线如图 1 所示，经过生产检验验证，整体设计流程合理，能够满足产品各项性能要求。

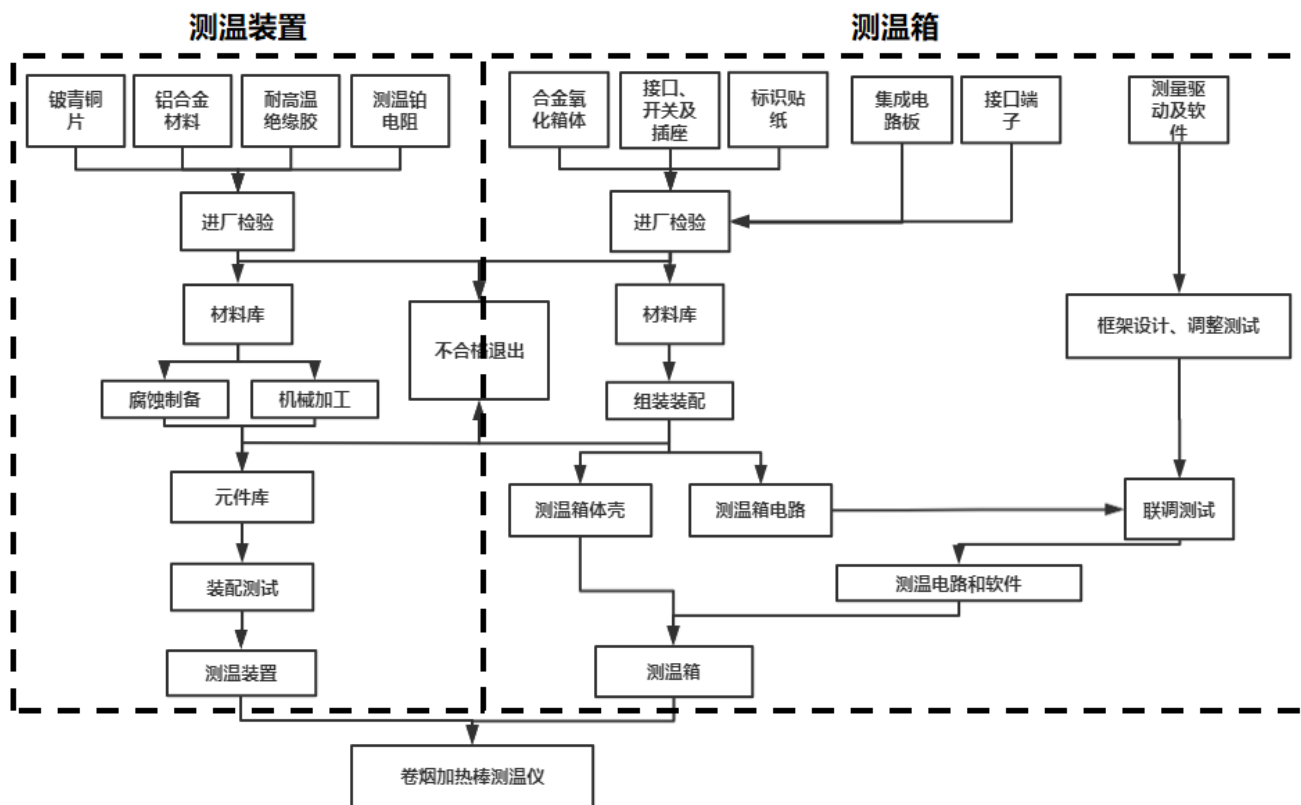


图 1 系统技术路线图

2.1 铂电阻选型

传热原理

铂热电阻利用金属铂的电性特征测量温度，其电阻随温度变化。这一原理可通过测量电阻值推算温度，具有温度系数分散性小、稳定的电气性能，以及高精度、高灵敏度和高可靠性等特点。针对加热卷烟烟具的特殊加热空间，选择薄膜铂电阻作为测温传感元件。

2.2 传热理论

传热是物质内部分子移动，使热量从高温向低温传递的过程。当介质内部或介质间存在温差时，必然会发生热量传递。在均匀介质中，单位面积上的热流量与温度梯度成正比，如式(1)所示。

$$\frac{1}{A} \frac{dQ}{dt} = -\lambda \nabla T = -\lambda \left[\frac{\partial T}{\partial x}; \frac{\partial T}{\partial y}; \frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad (1)$$

式中， Q 表示热流量， A 表示流经表面积， λ 表示物质导热率，负号表示热量在逆向温度梯度上流动。假定参数 λ 不变，同时介质中无热源，而温度改变由一个扩散方程表示，如式(2)所示。

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\lambda}{c\rho} \nabla^2 T = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

式中， C 表示比热容， ρ 表示介质的密度。

将三维公式(1)和(2)转化为一维，近似为无限薄介质中的热传导。若温度不变，温度梯度恒定不变。一维温度梯度如式所示。

$$\frac{dT}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d^2 T}{dx^2} = 0 \Rightarrow \frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{d} \quad (3)$$

式中， d 代表介质厚度， T_1 与 T_2 是介质内外两侧的温度。将式(3)代入式(1)得到下式：

$$\frac{1}{A} \frac{dQ}{dt} = -\lambda \frac{dT}{dx} = \frac{\lambda}{d} (T_1 - T_2) \quad (4)$$

场域测温设备外壳相当于上述介质，有许多均匀无限薄介质重叠组成，其中某一层 n 的热量流动如式(5)所示。

$$\frac{1}{A} \frac{dQ_n}{dt} = \frac{\lambda_n}{d_n} (T_n - T_{n+1}) \quad (5)$$

式中 T_n 、 T_{n+1} 分别表示 n 层两侧的温度。假定等同热流量经过每一层，即 $Q_n = Q$ 。

引入壳体的热阻力 $r = \sum_{n=1}^{N-1} (d_n / \lambda_n)$ ，将 A/r 表示为热阻 R ，表示为阻碍热传导的能力。通过测温设备壳体的热流量与壳体两边的温度差近似成比例，如式(6)所示。

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{T_1 - T_N}{R} \quad (6)$$

2.3 铂电阻传感器测温原理

铂电阻根据金属铂的电性特征测量温度，其电阻随温度变化，可通过测量电阻值推算温度。其中热传导在三维各向同性介质中的传播可用公式(7)进行计算。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \text{div}(Uu) = k \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = k(u_{xx} + u_{yy} + u_{zz}) \quad (7)$$

式中 $u = u(t, x, y, z)$ 温度，为时间变量 t 与空间变量 (x, y, z) 的函数； $\partial u / \partial t$ 为空间一点温度对时间的变化率； u_{xx} 、 u_{yy} 和 u_{zz} 为温度对三个空间坐标轴的二次导数； k 为热扩散率。

根据加热烟的温度范围，我们选择了 PT1000 和 PT100 两款铂电阻进行对比分析，PT1000 反应灵敏度高、自热小、测量精度更高[16-18]。结合测温范围和设计要，最终选定 PT1000 作为本系统的测温元件。

以下是铂电阻的温度特性：

当工作温度在 $0^\circ\text{C} \sim 650^\circ\text{C}$ 时， $C=0$ ，可化简为：

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (8)$$

式(8)中， R_t 为 $t^\circ\text{C}$ 时 PT1000 的阻值， R_0 为在 0°C 的阻值。TCR=0.00385 时的系数值为： $A=3.9083 \times 10^{-3}$ ， $B=5.775 \times 10^{-7}$ ， $C=4.183 \times 10^{-12}$ 。

考虑到加热卷烟烟具的特殊加热空间，需要一款形状大小合适的微型测量元件，因此在之前的基础上进一步选择 PT1000 薄膜铂电阻作为测温传感元件。其实物如图 2 所示，具体参数如表 1 所示：



图 2 铂电阻

表 1 薄膜铂电阻参数

测温范围	精度等级	电阻值	元件尺寸
-70 ℃~+500 ℃	F0.3 (Class B)	1000Ω (0 ℃)	2.3 2.0 x0.9mm (长 x 宽 x 厚)

3 系统软硬件设计

为优化测量精度和一体化，我们设计了紧凑的电控箱。该箱可装载工控平板和测温装置，设有切换功能，并预留了外设接口、电源接口，以及散热窗。电控箱结构如图 3 所示。

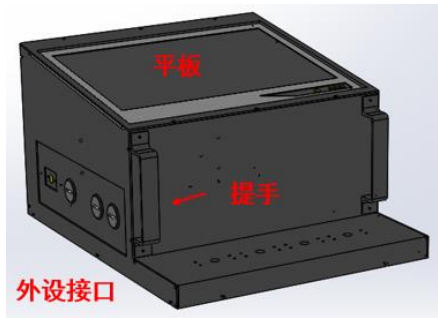


图 3 控箱结构示意图

3.1 温度采集器

本研究采用高精度的多通道温度检测设备来提升温度测定的精度和稳定性。该设备能同时处理四个测温装置的数据，满足 16 个铂电阻的测量需求，以获取更准确的温度结果。相关参数如表 2 所示。

表 2 高精度多通道温度检测设备参数

通道	最大采样率	测量精度	可支配传感器
16	400S/s	0.15 ℃	PT100RTD

3.2 主机切换设备

本研究采用高精度多通道温度检测设备，利用 USB 通信进行数据传输。同一设备只能与一个主机交互，因此需要主机切换。通过交换器实现两台电脑主机控制两个设备，如图 4 所示。



图 4 主机切换器

在本研究中，使用 LabVIEW 编写上位机软件来实现多项功能，包括设备通道的选择与配置、铂电阻校准和测试，以及数据的采集、显示和存储等如图 5 所示。



图 5 上位机开发界面

设定铂电阻测温的校准参数后，我们可进行定向温度采集，实时监控温度变化并储存关键数据，通过状态显示栏实时跟踪设备运行状况，确保其操作的稳定性和可靠性。

4 实验方案与数据分析

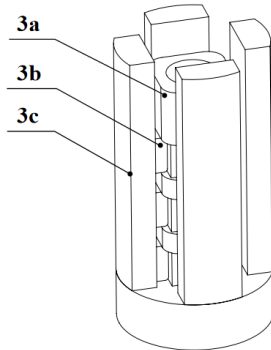
依据接触式测温原理，烟具加热片测温仪采用了铂电阻进行精确温度测量，此铂电阻符合《IEC60051-1》国际标准，其温度系数 α 设定为 0.003851。测温仪的主要特点包括手动插拔式测温方式，预设的限位，以及预紧和贴合测温功能。利用三/四线制接法，结合采集卡多通道同步快速采样技术，仪器可实时处理和显示测温数据，保证了测温工作的精确性和可靠性。通过对温度—时间曲线测试结果的误差和重复性比较，确定合适的设计方案[19, 20]。

4.1 实验方案

鉴于狭窄半封闭空间和微型棒状加热片，计划采用热传导和线接触两种方案进行测温仪的研发。

4.1.1 热传导方案

对于热传导方案，主要包含测温装置结构和采集电路。测温装置结构如图 6 所示，包括导热合金柱、测温铂电阻、限位隔热筒三部分。



3a-导热合金柱；3b-测温铂电阻；3c-限位隔热筒
图 6 热传导方案结构图

采集电路如图 7 所示，分为温度转换模块和上位机通讯模块。

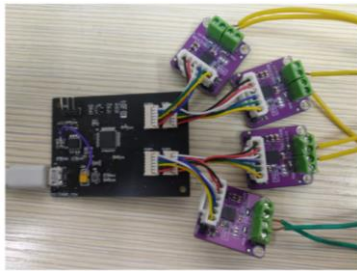
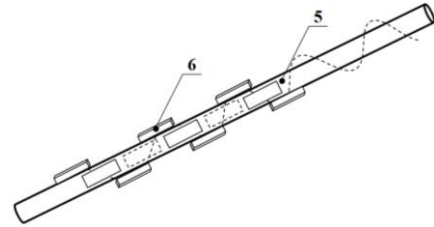


图 7 热传导电路图

本研究设计的测温仪，配有特殊高温耐热板材制的限位隔热筒，实现了在半封闭环境中对烟具加热片温度的精确测量。采用铂电阻测量来自高导热合金柱的温度，电阻值转换后在上位机显示。

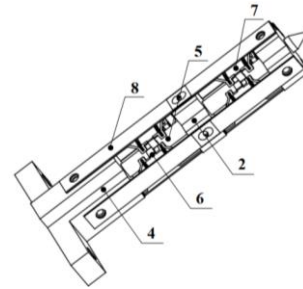
4.1.2 线接触方案

本文介绍了一种高效测温设备，其核心构成包含一个设有保护和限位机制的 L 形盖面加底座的固定装置，以及一个装配有铂电阻的中央测温结构。这种结构的设计可根据需要进行调整，以满足不同烟具加热片的温度测量需求。此外，该设备的中央测温结构还采用了一种双层弹性设计，从而在增强设备耐用性的同时，也显著提高了设备的抗干扰能力，如图 8、图 9 和图 10 所示。值得一提的是，该测温设备的所有组件都具有小型化、可加工和耐高温的特性，这在一定程度上提高了该设备的实用性和效率。



5-烟具加热片；6-螺旋上升排布的测温铂电阻

图 8 螺旋上升排布示意图



2-上盘十字件；4-下盘十字件；7、8-双层弹性梁
图 9 双层弹性梁示意图

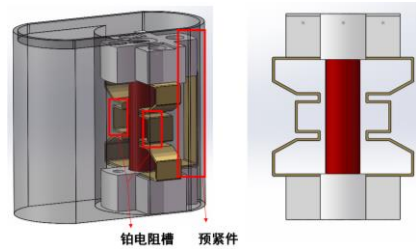


图 10 线接触设计图

4.2 关键技术解决

4.2.1 热传导方案关键技术

本研究通过导热合金铜并使用万用表和测温模块，以及四个对称的铂电阻收集温度数据，确保了测量的准确性，如图 11 所示。

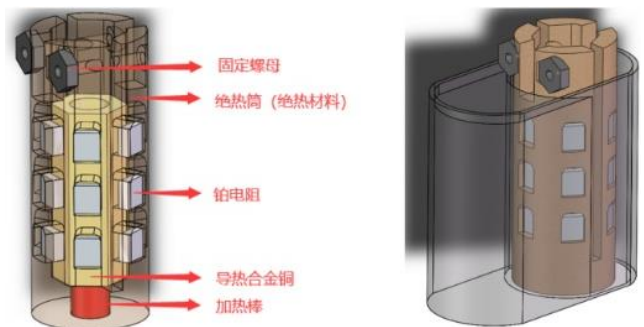


图 11 结构方案

重复四次插拔烟具加热数据如图 12(a)和(b)所示，其分别是 3 秒和 1 秒间隔的数据。结果显示热传导稳定，插拔时温差始于 4℃，稳定时温差在±1℃，峰值为 135℃ 至 136℃。

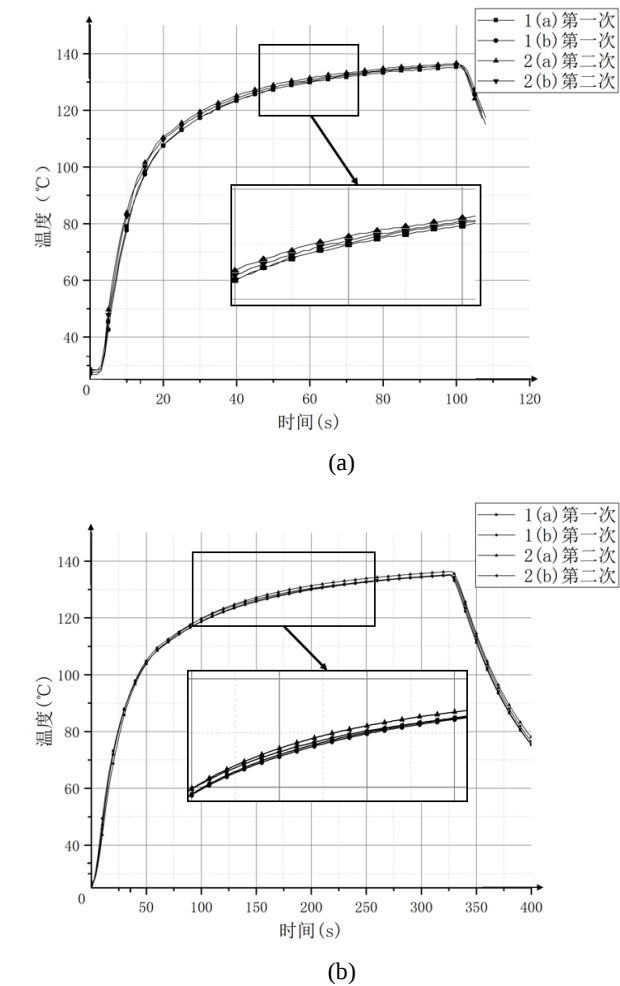


图 12 热传导方案验证结果

在进行的试验研究中，我们测量得到的电阻温度差数据在加热阶段位于 3℃ 至 6℃ 的范围，降温过程中保持在 0℃ 至 1℃，以及在恒温阶段稳定在 0℃ 至 3℃ 区间。峰值温度达到约 135℃，其差异值未超过 2℃。

4.2.2 线接触方案关键技术

使用线接触方案对加热烟具进行测试，测试结果如表 3 所示。

表 3 线接触测试数据

铂电阻	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次
1 号	227.2	230.7	228.9	228.9	231.2
2 号	226.0	225.6	226.2	226.0	225.9
3 号	225.9	218.7	224.3	223.4	222.3

从数据来看，线方案的重复性较热传导稍显不足，结构稳定性有待提高。值得我们注意的是，由于之前使用的热传导测温方法存在接触贴合问题，会导致实际温度与理论预计温度之间存在较大的偏差。在线接触方案也存在结构不够坚固稳定的问题，因此我们对线接触方案进行了改良。面对工件尺寸精度高及簧片扭摆带来的贴合问题，我们对工件尺寸适配和加工质量做了改善，设计包含的 L 形盖面加底座的固定装置，通过簧片预压，实现工件与加热片的稳定接触，提升了工件的抗扭摆能力，解决了接触贴合问题，从而减少热量损失，更准确地测量出烟具加热片的实际温度。具体如图 13 所示。

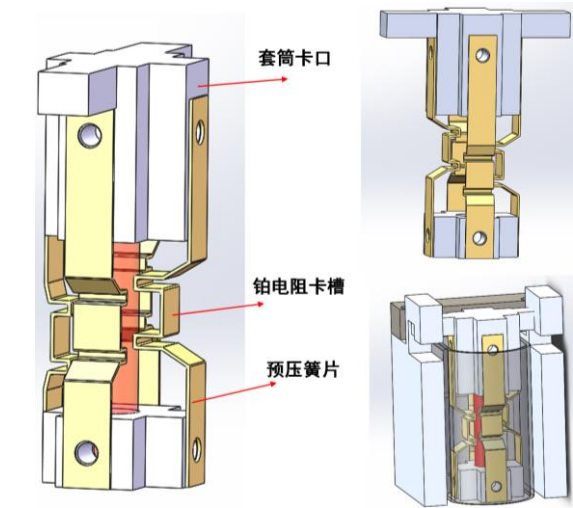


图 13 线接触方案改进设计图

通过实验对线接触方案进行验证，并列出了四次插拔烟具加热片的结果。用线接触测温方案结构进行烟具加热片进行重复测温，测温结果如图 14 所示。

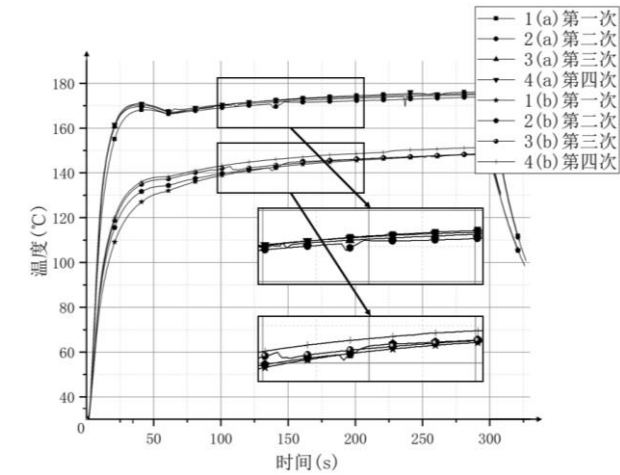


图 14 线接触方案验证结果

经过对两种测温方案的实验验证,我们最终决定采取线接触方案。为了确保烟具加热片测温仪的性能指标符合使用标准,我们对该方案的测温结构进行了优化,从而提高了其测温的重复性和结构稳定性。

4.3 实验结果与分析

整体装置参考《GB/T38853-2020》、《GB/T30121-2013》、《GB/T19765-2005》等相关标准,为确保设备检测准确度,拟采用FLUKE高精度干井炉对温度检测单元进行量值溯源。干井炉测量范围为 $35^{\circ}\text{C}\sim 425^{\circ}\text{C}$,稳定性不超过 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$,负载影响显示准确度为 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$,可满足温度检测设备校准需求如图15所示。



图15 FLUKE 干井炉

经过严格的实验验证,我们发现所用的铂电阻测温精度能在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 的范围内精确测量。另外,在实物加热和恒温测试中,烟具加热片测温仪的性能完全达到了使用要求。最后,通过采用线接触测温方案,我们对烟具加热片进行了重复性测试,验证了其梯度稳定性和高达 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 的重复性,如图16所示。

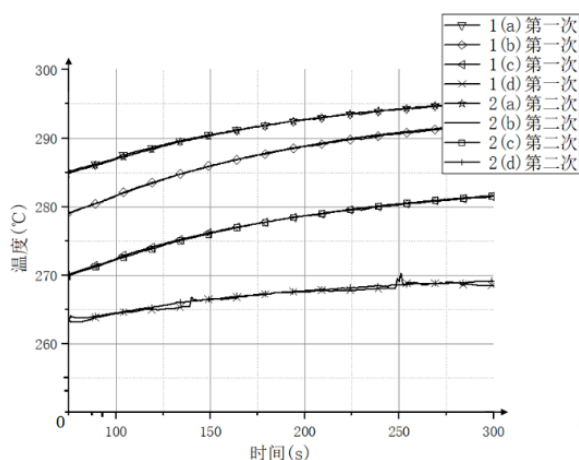


图16 产品实测数据

随后,使用9支(灰色6支、白色3支)烟具进行编号测试,如图17所示。测试过程中,对烟具加热片测温仪的测试温度进行记录,灰色烟具温度数据如图18所示。



图17 测试烟具

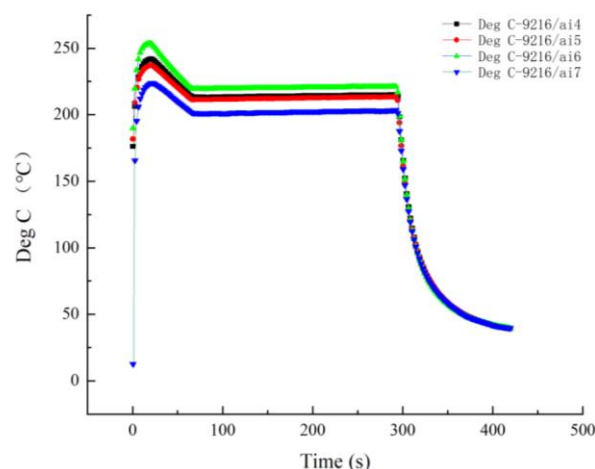


图18 测试温度数据

烟具温度测试是改进加热卷烟工艺的关键。温度分布可提升其质量和安全性。灰色烟具多次测试验证了测温仪性能指标的稳定性,为后续研究奠定基础。

5 结论

目前,市面上已有的针对微型高温发热元件的测温装置,测温点较少且重复性较差,无法满足在狭窄空间下的测温需求,而且多数无法耐高温。本文研发的烟具加热片测温仪,可进行点多组测温,满足烟具加热片的温度分布测量需求,具有耐高温、高重复性、高使用度和高稳定性的优点。设备的研制及应用,改变了加热温度依赖厂家提供、厂家以功率计算温度的局面,填补国内外加热卷烟烟具加热温度检测空白,提高技术中心质量检测能力,降低烟具不合格机率,减少经济损失,提高公司效益。

参考文献

- [1] Mallock N, Böss L, Burk R, et al. Levels of selected analytes in the emissions of "heat not burn" tobacco products that are relevant to assess human health risks [J]. Archives of Toxicology, 2018, 92: 2145-2149.
- [2] Forster, Mark, Fiebelkorn, et al. Assessment of novel tobacco heating product THP1.0. Part 3: Comprehensive chemical characterisation of harmful and potentially harmful aerosol emissions [J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology: RTP, 2018, 93: 14-33.
- [3] Forster, Mark, McAughey, et al. Assessment of tobacco heating product THP1.0. Part 4: Characterisation of indoor air quality and odour [J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology: RTP, 2018, 93: 34-51.
- [4] Baker R R. Smoke generation inside a burning cigarette: Modifying combustion to develop cigarettes that may be less hazardous to health [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2006, 32(4): 373-385.
- [5] Werley M S, Freelin S A, Wrenn S E, et al. Smoke chemistry, in vitro and in vivo toxicology evaluations of the electrically heated cigarette smoking system series K [J]. Regulatory Toxicology & Pharmacology, 2008, 52(2): 122-139.
- [6] 李翔, 谢复炜, 刘惠民. 新型烟草制品毒理学评价研究进展 [J]. 烟草科技, 2016, 49(01): 88-93.
- [7] Jankowski M, Broek G M, Lawson J, et al. New ideas, old problems? Heated tobacco products-A systematic review [J]. International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health, 2019, 32(5): 1-41.
- [8] Auer R, Concha-Lozano N, Jacot-Sadowski I, et al. Heat-not-burn Tobacco Cigarettes: Smoke by Any Other Name [J]. JAMA Internal Medicine, 2017, 177(7): 1050-1052.
- [9] Mallock N, Pieper E, Hutzler C, et al. Heated Tobacco Products: A Review of Current Knowledge and Initial Assessments [J]. Frontiers in Public Health, 2019, 7: 1-8.
- [10] Caputi T L. Heat-not-burn tobacco products are about to reach their boiling point [J]. Tobacco Control, 2016, 26(5): 1-2.
- [11] 卢乐华, 任举, 毕艳玖等. 典型电加热卷烟与传统卷烟烟气粒相成分比较研究 [J]. 中国烟草学报, 2024, 30(01): 121-128.
- [12] 徐宏, 陈焰, 汤建国等. 电加热新型卷烟烟具温度对象分析 [J]. 安徽农业科学, 2017, 45(08): 215-216+223.
- [13] 刘成, 汪旭, 杨菁等. 电加热卷烟传热传质数值模拟研究现状 [J]. 中国烟草学报, 2023, 29(04): 116-123.
- [14] 杨建礼, 吴成春, 宋祖国. 加热不燃烧卷烟加热技术探究 [J]. 轻工科技, 2023, 39(05): 23-26.
- [15] 吴岳洋, 覃方君, 李冬毅等. 应用于 MTS 的多点测温系统设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2023, (11): 73-77.
- [16] 郑宁, 冯胜科, 鲍捷等. 缠绕管排列方式对传热性能影响的数值模拟 [J]. 机械设计与制造, 2022(10): 222-228.
- [17] 谢纬安, 彭婧华, 喜冠南. 内置圆柱对台阶绕流流动及传热特征的影响 [J]. 机械设计与制造, 2022(09): 83-87.
- [18] 陈天翔, 庄曙东, 董春光等. 外部水冷对热轧卷取机扇形板温度场分布影响的研究 [J]. 机械设计与制造, 2023(05): 226-232+237.
- [19] 刘纯仁. 河北霸州石油四处地热平台井施工工艺研究 [J]. 能源科学技术, 2024, 3(1): 12-13.
- [20] 李鑫, 张杰, 高东华等. 深层煤岩力学特性在变温条件下的演化机制实验研究 [J]. 能源科学与技术, 2022, 1(1): 2-6.