

李典, 高峰涵, 李志华, 等. 烟油型电子烟雾化温度特性的相似扩尺实验研究 [J]. 中国烟草学报, 2020, 26 (5). LI Dian, GAO Yihan, LI Zhihua, et al. Similarity experiment on temperature characteristics of e-cigarette and establishment of scaled-model experimental platform [J]. Acta Tabacaria Sinica, 2020, 26 (5). doi: 10.16472/j.chinatobacco.2019.316

烟油型电子烟雾化温度特性的相似扩尺实验研究

李典¹, 高峰涵², 李志华¹, 吴晋禄³, 杨牧沅³, 高乃平³, 谢焰^{*2}, 陆漓^{*1}

1 广西中烟工业有限公司, 广西南宁市北湖南路28号 530001;

2 上海新型烟草制品研究院有限公司, 上海市秀浦路3733号 201315;

3 同济大学, 上海市四平路1239号 200092

摘要: 【目的】提出一种采集烟油型电子烟实验参数的新方法。【方法】基于相似原理设计搭建电子烟扩尺实验台, 采用由丙二醇 (PG) 和丙三醇 (VG) 组成的不同配比的烟油进行相似实验研究。根据各物理量间的相似准则关系, 模型实验数据可换算得到原型电子烟的数据。【结果】(1) 在相同加热功率及抽吸模式条件下, 纯 VG 的电加热丝温升速率高于纯 PG, 加热丝温升速率随 VG 含量增大而增大。(2) 雾化芯中加热丝的温升速率最高, 加热丝与导油棉交界处的温升速率次之, 棉中心位置最慢。(3) 在三口连续抽吸实验中, 每口抽吸过程中各温度测点的初始及最高温度会随抽吸口数呈整体抬升趋势。

关键词: 电子烟; 温度特性; 扩尺实验台; 相似实验

烟油型电子烟作为一种新型烟草制品, 在全球范围内受到越来越多的关注^[1-3]。虽然电子烟与传统卷烟相比具有较低的风险^[4], 但其产品性能与健康安全仍是电子烟研究领域的热点问题^[5-7]。

电子烟雾化温度不仅对产品性能有重要影响, 其对气溶胶中羰基化合物及金属氧化物的生成也起关键作用。如 Flora 等^[8]通过改进型超高效液相色谱-质谱联用法捕集电子烟气溶胶中的羰基化合物, 实验测试结果指出, 随着电子烟工作温度的升高, 其生成气溶胶中醛类化合物的含量增大。Geiss 等^[9]利用红外热相仪采集了加热线圈在不同加热功率条件下的工作温度, 对电子烟羰基化合物释放量与加热线圈温度的关联性进行研究, 实验结果表明, 当电子烟加热功率增大后, 气溶胶产物中甲醛、乙醛、丙烯醛的含量会相对提高。Williams 等^[10]采用扫描电子显微镜-能谱分析技术等手段, 检测了烟弹式电子烟气溶胶中 21 种元素含量, 其中含量较高的元素有 Na、Si、

Fe、Al、Pb、Cr、Ni 等。因而对电子烟雾化温度特性的研究, 不仅有利于改善产品性能, 也有助于防控电子烟健康安全风险。

目前, 有相关学者在电子烟雾化温度特性方面进行了一些研究工作, 但文献报道的电子烟温度测试方法存在一些不足之处。如 Zhao 等^[11]利用热电偶监测电子烟雾化器的工作温度, 从电子烟烟嘴烟雾通道出口处插入一根热电偶探针, 但由于电子烟几何尺寸有限, 无法确定探针测点在雾化芯上的具体位置, 即无法判断探针测点与电加热丝直接接触还是与导油棉接触, 因此作者假设热电偶所测温度即代表电加热丝工作温度。Geiss 等^[9]将电子烟雾化芯的外围结构拆卸后, 通过红外热像仪监测电加热丝的工作温度, 实验过程无抽吸气流, 故无法模拟电子烟的实际抽吸过程。Chen 等^[12]利用热电偶与红外热像仪对电子烟工作温度同时进行监测, 实验过程中烟嘴拆卸且无抽吸气流, 不同阻值电加热丝分别在两种配比烟油和三种油棉润

作者简介: 李典 (1988—), 博士, 高级工程师, 主要研究方向为新型烟草制品化学与材料研究, Tel: 0771-8098351, Email: lid@gxzy.cn
高峰涵 (1984—), 硕士, 主要研究方向为新型烟草制品基础研究, Tel: 021-61661835, Email: gaoyh@sh.tobacco.com.cn
(以上两位并列第一作者)

通讯作者: 谢焰, Tel: 021-61661831, Email: xiey@sh.tobacco.com.cn; 陆漓, Tel: 0771-8098523, Email: 44733983@qq.com

收稿日期: 2019-10-26; **网络出版日期:** 2020-06-09

湿度条件下进行实验测试,但其无法模拟电子烟的正常工作过程。

烟油型电子烟加热段几何尺寸十分有限,在电子烟内部布置多个温度测点十分困难,且难以准确判断温度测点的接触位置,这是电子烟雾化温度特性研究的难点。本研究基于相似原理设计搭建电子烟扩尺实验台,可以方便有效地测试电子烟雾化芯的温度变化特性,为电子烟的科学研究提供一种新方法。

1 相似实验

由于烟油型电子烟原型器具几何尺寸有限,不便于相关物理参数的采集测试,本研究基于相似原理设计搭建电子烟扩尺模型实验台,并在实验台基础上进行系列模型实验。

1.1 相似实验设计原理

对于两个同类的物理现象,与现象相关的物理量在对应的时刻及位置上相互对应成比例,则这两个物理现象彼此相似。根据原型电子烟的工作特性,在设计相似实验前对电子烟进行合理条件假设:1) 烟雾通道内气流外掠雾化芯过程是流体横掠单管的外部强制对流换热过程;2) 电加热丝加热雾化芯过程可等效为圆柱体外表面的面加热过程,液态烟油在雾化芯外表面发生相变汽化;3) 导油棉纤维骨架与液态烟油间始终处于热平衡状态,局部热平衡假设成立,即导油棉纤维骨架与液态烟油温度相同。

实验采用的液态烟油主要是由甘油与丙二醇组成,两者都属于非电解质液体,此类液体不能电离产生自由移动的离子,其不具备导电性,故本研究中不考虑烟油导电率造成的电化效应以及对烟油雾化温度的影响。

在相似实验中,电子烟抽吸过程涉及到的相似准则包括如下。

雷诺准则,表征电子烟抽吸气流的惯性力与粘性力之比。

$$Re = \frac{ul}{\nu} \quad (1)$$

式中, Re —雷诺数; u —特征速度, m/s; l —特征尺寸, m; ν —运动黏度, m^2/s 。

努塞尔准则,表征气流通道壁面上抽气气流的无量纲温度梯度。

$$Nu = \frac{hl}{\lambda} \quad (2)$$

式中, Nu —努塞尔数; h —对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; λ —导热系数, $W/(m \cdot K)$ 。

傅里叶 Fo 准则,表征非稳态过程的无量纲时间,其与电子烟的抽吸时间和抽吸间隔有关。

$$Fo = \frac{\lambda \tau}{\rho c_p l^2} \quad (3)$$

式中, Fo —傅里叶数; τ —时间, s; ρ —密度, kg/m^3 ; c_p —定压比热容, $J/(kg \cdot K)$ 。

普朗特准则,表征动量扩散能力与热量扩散能力的一种度量。

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} \quad (4)$$

式中, Pr —普朗特数; μ —动力黏度, $Pa \cdot s$ 。

两物理现象相似需要满足如下条件:(1) 只有同类的物理现象才能谈论相似问题,同类现象是指那些由相同形式并具有相同内容的微分方程式所描述的物理现象;(2) 与现象有关的物理量要一一对应成比例;(3) 对于非稳态问题,要求在相应的时刻各物理量的空间分布需满足相似,对于稳态问题则没有相应时刻的要求^[13]。

凡是彼此相似的现象,描述该现象的同名特征数(即准则数)应相等。即要实现模型实验与原型实验相似,需满足如下条件: $Re = Re'$ 、 $Nu = Nu'$ 、 $Fo = Fo'$ 、 $Pr = Pr'$ 。(符号右上角带“'”表示原型参量)

关于模型实验与原型实验中加热功率的相似倍数准则,本实验通过雾化芯加热区能量守恒微分方程以及相应的边界条件和初始条件,推导得到电加热丝加热功率的相似倍数关系。

电子烟雾化芯几何结构及坐标示意图,如图1所示。

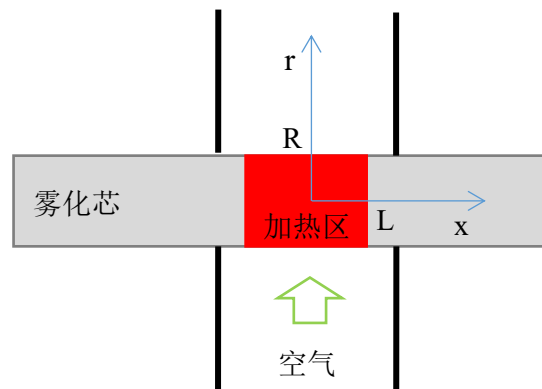


图1 电子烟雾化芯的结构示意图

Fig. 1 The schematic diagram of the atomizing core of electronic cigarette

雾化芯的能量方程模型如下（局部热平衡假设成立，即导油棉固体纤维骨架与液态烟油的局部温度相同）：

$$\rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial \tau} + \rho_{liq} c_{p,liq} \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \lambda_s \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right) \quad (5)$$

式中， ρ^* —雾化芯（包括了导油棉与液态烟油）密度， kg/m^3 ； c^* —雾化芯比热容， $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ； T —温度， K ； ρ_{liq} —烟油密度， kg/m^3 ； $c_{p,liq}$ —烟油比热容， $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ； u —烟油沿轴向 x 的分速度， m/s ； x —横坐标； v —烟油沿径向的分速度， m/s ； r —纵坐标； λ^* —雾化芯的导热系数， $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

当 $\tau = 0$ 时，初始条件如下：

$$T = T_\infty \quad (6)$$

式中， T_∞ —周围环境温度， K 。

根据图1建立的雾化芯几何坐标，可列出边界条件。

在 $r = \pm R$ ， $-L/2 \leq x \leq L/2$ 边界处，有：

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} + h(T - T_\infty) + \left(u \pi R^2 \rho_{liq} - \frac{\partial m_{liq}}{\partial \tau} \right) \frac{h_{fg,liq}}{A} = \frac{P}{A} \quad (7)$$

式中， R —雾化芯半径， m ； L —雾化芯加热区长度， m ； m_{liq} —烟油质量， kg ； $h_{fg,liq}$ —烟油汽化热， J/kg ； P —加热功率， W ； A —加热区面积， m^2 。

将模型参量与原型参量的比例表达式（如导热系数的比例式： $\lambda_r = \frac{\lambda'}{\lambda}$ ，其中带下标“r”的符号表示

模型参量与原型参量的比值）代入上述能量方程、初始条件及边界条件描述方程中，并根据相似原理可以推导得到加热功率的无量纲准则式：

$$r_r = \frac{1}{h_r} = \frac{1}{u_r} = \frac{A_r \tau_r}{m_r} = \frac{A_r}{P_r} \quad (8)$$

根据无量纲准则数及方程，当模型实验台的几何尺寸放大至原型电子烟器具的 X 倍时，可以得到模型实验中相关参数的倍数关系：抽吸流量增大 X 倍，抽吸时间与抽吸间隔增大 X^2 倍，加热功率增大 X 倍。

本实验将原型电子烟几何尺寸放大了5倍（即 $X=5$ ），模型实验与原型实验中相关参数之间的关系如下表所示。

表1 模型实验台与原型电子烟的几何尺寸参数对比表

Tab. 1 Comparison of geometric dimension parameters between the scaled-model experimental bench and the prototype electronic cigarette

模式	雾化芯 长度 / mm	雾化芯 直径 / mm	电加热 丝圈径 /mm	电加热 丝线径 /mm	电加热 丝圈数	气流通 道内径 /mm
原型电子烟	16	3	3	0.5	5	8
模型实验台	80	15	15	0.5	25	40

注：扩尺实验台的雾化芯材质是有机棉，电加热丝阻值大约 8.24Ω 。

表2 模型实验与原型实验的工况参数对比表

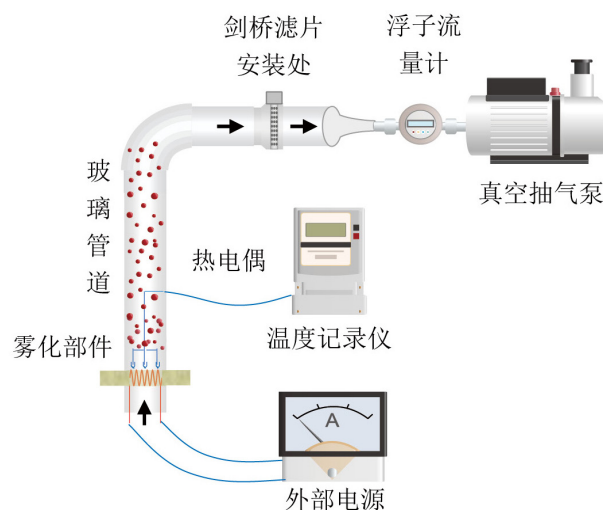
Tab. 2 Comparison of working parameters of model experiment and prototype experiment

模式	抽吸流量 / (mL/s)	抽吸时间 /s	抽吸间隔 /s	加热功率 / W
原型实验	18.3	3	30	P
模型实验	91.5	75	750	5P

注：原型电子烟采用CORESTA（国际烟草研究合作中心）工作小组推荐的抽吸方式（抽吸曲线：方波，抽吸容量：55 mL，抽吸时间（加热时间）：3 s，抽吸间隔：30 s）。其中，P—加热功率，W。

1.2 实验台装置及主要操作过程

根据相似原理设计搭建的电子烟扩尺实验台的工作原理图，如图2所示。实验台主要组成部分包括：耐高温石英玻璃管（对应于原型电子烟的气流通道）、真空抽气泵（模拟人的抽吸过程）、玻璃转子流量计（调节抽吸流量）、无纸记录仪、微细K型热电偶（探针直径0.5 mm）、导油棉（对应于原型电子烟的雾



注：雾化芯不处于密闭状态，烟油是从雾化芯两端加入。

图2 电子烟扩尺实验台结构原理图

Fig. 2 The structural schematic diagram of the scaled-model experimental bench for electronic cigarettes

化芯)、电加热丝(对应于原型电子烟的电热线圈)、直流稳压电源(对应于原型电子烟的电池)、电子天平、剑桥滤片。主要仪器仪表的信息参数如表 3 所示。

实验台通过调节真空抽气泵外接的玻璃转子流量计来控制抽吸流量,调节得到实验工况的目标流量值,模拟电子烟抽吸气流。其中,直流稳压电源为电加热

丝提供电能,通过调节电压或电流值来改变输出电功率;无纸记录仪与热电偶可实时采集雾化芯的工作温度、管道内抽吸气流的温度以及环境空气温度,温度采集频率为 10 Hz;管道中的剑桥滤片用于捕集气溶胶总粒相物;通过电子天平对实验前后的剑桥滤片进行称重测试。

表 3 仪器仪表信息汇总
Tab. 3 The information of instruments

名称	生产商	型号	工作范围	精度	分辨力或其它
热电偶	颜历自动化仪表(上海)	WRNK-191	0~550℃	±2.5℃(Ⅱ级精度)	Φ0.5×100 mm
无纸记录仪	杭州逸控科技有限公司	R90	-200~1370℃	±3℃(±0.2% F·S)	0.1℃ 10 Hz
直流稳压电源	东莞市迈豪电子科技	MS-3010D	0~30 V 0~10 A	±0.5%+1 字(三位) ±0.1%+1 字(四位)	0.01 V 0.01 A
真空抽气泵	达尔拓	XVP180	0~30 L/min -85~0 kPa	~	~
电子天平	赛多利斯	BSA124S	0~120 g	≤±0.1 mg	0.1 mg
玻璃转子流量计	上海银鋈自动化	LZB-6WB	1~10 L/min	±2.5%	0.5 L/min

1.3 测试工况

电子烟扩尺实验台模型实验采用的烟油包括以下 4 种:纯 PG、纯 VG、PG:VG=1:1(vol)、A 烟油(组分质量配比 wt: 丙二醇 47.6%、丙三醇 48%、烟碱 1%、其它 3.4%)。在不同加热功率条件下进行变工

况实验,其中实验台抽吸模式可参照表 2 中模型实验参量进行操作。模型实验与原型实验之间的加热功率相似关系如表 4 所示,不同烟油各进行了 5 组变工况实验。

表 4 模型实验与原型实验的加热功率相似倍数关系工况测试表
Tab. 4 The similarity relation of heating power between model experiment and prototype experiment

实验编号	烟油组成	模型实验的功率/W	原型实验的功率/W	实验编号	烟油组成	模型实验的功率/W	原型实验的功率/W
1	纯 PG	7.28	1.46	11	PG:VG=1:1(vol)	6.80	1.36
2	纯 PG	12.00	2.40	12	PG:VG=1:1(vol)	12.00	2.40
3	纯 PG	17.52	3.50	13	PG:VG=1:1(vol)	22.80	4.56
4	纯 PG	26.60	5.32	14	PG:VG=1:1(vol)	32.90	6.58
5	纯 PG	41.60	8.32	15	PG:VG=1:1(vol)	45.44	9.09
6	纯 VG	7.28	1.46	16	A 烟油	6.72	1.34
7	纯 VG	12.50	2.50	17	A 烟油	10.90	2.18
8	纯 VG	23.64	4.73	18	A 烟油	18.00	3.60
9	纯 VG	33.18	6.64	19	A 烟油	23.52	4.70
10	纯 VG	41.60	8.32	20	A 烟油	33.44	6.69

2 结果与讨论

对由各物理量间相似准则倍数关系推算得到的原型电子烟实验结果进行如下讨论分析。

2.1 不同烟油类型对雾化温度的影响

在相近加热功率条件下（实验过程中通过调节直流稳压电源的输出电压来改变输出功率，但由于受实验条件的限制，无法保证每次输出功率都保持一致，故选取相近功率的实验工况测试结果进行对比分析），针对纯 PG、纯 VG、PG : VG = 1 : 1 (vol) 三种烟油液体进行实验测试，原型电子烟电加热丝温度随时间的变化特性，如图 3 所示。由图可知，电加热丝在通电加热前的初始温度大约 17℃，经过 3 s 加热后，电加热丝温度随着加热时间逐渐上升，VG 在 4.73 W 加热功率条件下工作温度可达 272.0℃；PG : VG = 1 : 1 (vol) 在 4.56 W 加热功率条件下工作温度可达 202.9℃；PG 在 5.32 W 加热功率条件下工作温度可达 173.1℃。电子烟在相同或相近加热功率条件下，烟油中 VG 含量越高，电加热丝温升速率越快。

将 PG 与 VG 视为理想液体，根据拉乌尔定律、道尔顿分压定律与安托万方程，推算得到不同温度条件下 PG 与 VG 的饱和压力参数，如表 5 所示。由下表分析可知，在相同温度条件下，VG 的饱和压力要比 PG 低很多，例如：50℃时，PG 与 VG 的饱和压力数值在数量级上相差 10^5 ；150℃时，两者在数量级上相差 10^2 。两者数值大小的数量级偏差会随着温度的升高而减小。在烟油温升汽化过程中，纯 PG 的蒸发汽化速率要比纯 VG 快，纯 PG 消耗的相变潜热量在电加热丝供给热量中的占比要比纯 VG 高，而电加热丝供给热量中贡献于 PG 的温升显热量的占比会相

表 5 不同温度条件下 PG 与 VG 的饱和压力参数

Tab. 5 The saturation pressure parameters of PV and VG under different temperatures

温度 /℃	饱和压力 /kPa		数量级偏差
	PG	VG	
30	0.044	1.505×10^{-8}	10^6
50	0.181	2.646×10^{-6}	10^5
100	3.164	0.006	10^3
150	27.254	0.394	10^2
188 (PG 沸点)	101.174	3.316	10^2
200	~	5.742	~
250	~	36.448	~
288 (VG 沸点)	~	101.496	~

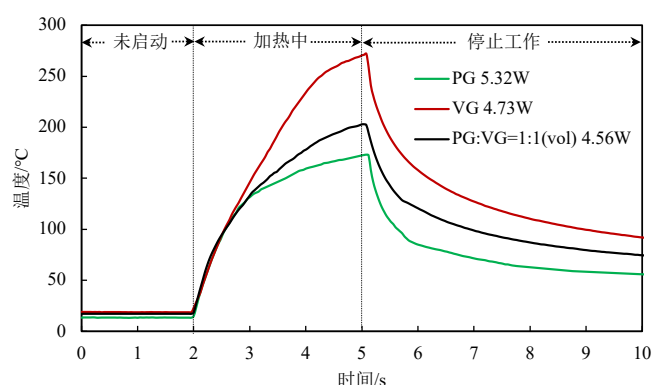


图 3 三种烟油条件下电加热丝温度随时间的变化特性
(抽吸流量: 18.33 mL/s, 加热时间: 3 s)

Fig. 3 The temperature variation characteristics of coil with time under the condition of three types of e-liquid (puffing flow rate: 18.33 mL/s, puffing time: 3 s)

对减小，故纯 PG 的电加热丝温升速率要比纯 VG 慢，PG : VG = 1 : 1 (vol) 混合烟油溶液的电加热丝温升速率则介于两者之间。

2.2 雾化芯不同测点位置的温度变化规律

针对原型电子烟采用 PG : VG = 1 : 1 (vol) 为烟油工质，加热功率为 2.40 W，抽吸流量 18.33 mL/s，加热时间 3 s 的工况，共布置有 5 个温度测点：电加热丝、电加热丝与导油棉交界处、棉中心、管内气流、环境空气，各测点的温度变化过程如图 4 所示。周围环境空气平均温度大约为 13.0℃，当原型电子烟经过 3 s 加热后，电加热丝温度可达 116.1℃，电加热丝与导油棉交界处的温度可达 80.2℃，棉中心温度最高大约 59.9℃，管内气流温度最高大约 25.1℃。

由图分析可知，雾化芯各温度测点中电加热丝的温升速率最快，电加热丝与导油棉交界处的温升速率次之，棉中心位置处温度响应速率最慢。导油棉径向上离电加热丝越远的位置，其温度变化响应速率也相对越慢。由于导油棉存在一定的热惯性，且电加热丝释放的热量通过热传导方式传递至导油棉内部需要一定的过程时间，导油棉内部温度的响应过程存在迟滞效应。当电子烟通电加热后，电加热丝温度开始快速上升，棉中心温度则需要经过一段时间后才出现缓慢上升。当电子烟断电停止工作后，电加热丝温度出现快速下降，棉中心温度则会保持一段时间的上升趋势后才开始出现缓慢下降。电加热丝加热功率越大，棉内部温度的响应速率越快。

由于电子烟雾化芯工作温度随着加热时间而逐渐上升，烟油汽化量随之增大，烟油蒸汽遇冷冷凝释放的相变潜热量以及抽吸气流与雾化芯间的对流散热量

增多, 故抽吸气流温度会随之逐渐升高。若电子烟加热功率过大, 则较高的抽吸气流温度会造成人体口腔与呼吸道的灼烧刺激感, 影响抽吸口感。电子烟抽吸气流温度的影响因素包括四个方面: 进气口环境空气温度、抽吸流量大小、烟油蒸汽遇冷冷凝释放的相变潜热量、雾化芯与抽吸气流间的对流换热量。

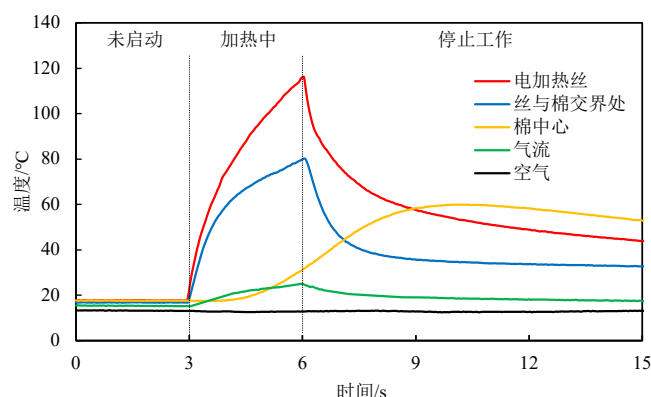


图4 不同测点的温度变化特性(烟油: PG:VG=1:1(vol), 加热功率: 2.40 W, 抽吸流量: 18.33 mL/s, 加热时间: 3 s)

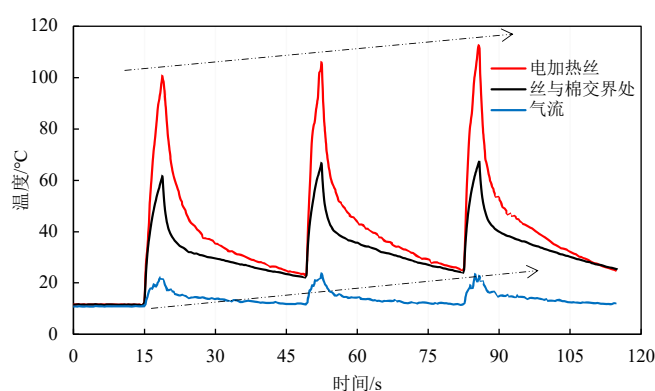
Fig. 4 The temperature variation characteristics at different measuring points (e-liquid: PG:VG=1:1(vol), heating power: 2.40 W, puffing flow rate: 18.33 mL/s, puffing time: 3 s)

2.3 三口连续抽吸实验

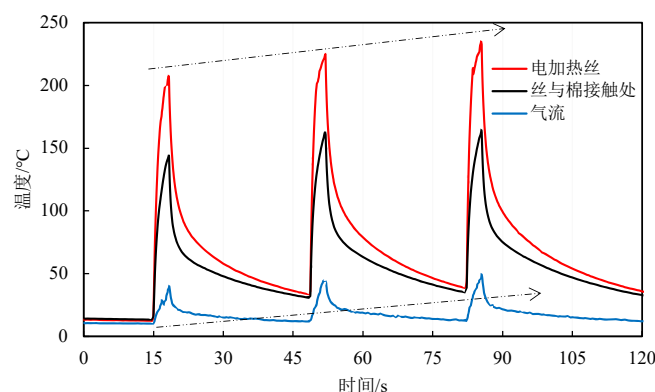
在三口连续抽吸实验中, 烟油类型采用 A 烟油, 不同测点的温度变化特性如图 5 所示, 温度测点包括三个: 电加热丝温度、电加热丝与导油棉交界处温度、抽吸气流温度。由图 5 (a) 可知, 当加热功率为 2.20 W, 加热时间 3 s、抽吸间隔 30 s、抽吸流量 18.33 mL/s 时, 在三口连续抽吸过程中, 电加热丝初始温度大约 11.5°C (第一口抽吸)、22.6°C (第二口抽吸)、24.8°C (第三口抽吸), 电加热丝最高温大约 100.1°C (第一口抽吸)、106.5°C (第二口抽吸)、112.9°C (第三口抽吸)。图 5 (b) 是加热功率为 4.70 W 时的结果曲线图。

由于受雾化芯热惯性的影响, 在三口连续抽吸实验中, 每口抽吸过程中各温度测点的初始温度及最高温度会随抽吸口数整体呈上升趋势。电子烟雾化芯温度越高, 其储蓄的显热量越多。在第一口加热结束后的抽吸间隔 30 s 期间内, 雾化芯储蓄的显热量在温差作用下向周围消散, 其温度发生下降。在开始第二口抽吸时, 雾化芯储蓄的显热量还未完全消散结束, 故第二口抽吸时的初始温度会比第一口初始温度来得高。在此基础上, 第二口加热结束时雾化芯储蓄的显热量包括了第一口未消散完的显热量和第二口加热期间储蓄的显热量, 第二口加热结束时储蓄的显热量会比第一口

加热结束时来得多, 故雾化芯各温度测点在第二口加热结束时达到的最高温度值会比第一口来得大。此外, 由于第二口加热结束时雾化芯整体温度相对上升, 烟油汽化量增多, 抽吸气流与雾化芯间的对流换热量以及烟油蒸汽遇冷冷凝释放的相变潜热量增大, 故第二口加热结束时抽吸气流达到的最高温度值也会比第一口来得大。同理, 随着抽吸口数的继续增加, 各测点温度变化规律的机理解释与上述相似, 不再进行赘述。



(a) 加热功率: 2.20 W



(b) 加热功率: 4.70 W

图5 三口连续抽吸实验中不同测点的温度变化特性(A 烟油, 加热时间: 3 s、加热间隔: 30 s、抽吸流量: 18.33 mL/s)

Fig. 5 The temperature variation characteristics at different measuring points in the three consecutive puffing experiment (A type e-liquid, puffing time: 3 s, puffing interval: 30 s, puffing flow rate: 18.33 mL/s)

在三口连续抽吸实验中, 根据相似准则将模型实验数据推算得到原型电子烟的雾化结果, 如表 6 所示。由表分析可知, 在三口连续抽吸实验中, 平均每口气溶胶总粒相物(实验前后的剑桥滤片增重量除以抽吸口数)、烟油平均汽化速率(平均每口气溶胶总粒相物除以抽吸时间)、气溶胶平均质量浓度(烟油平均汽化速率除以抽吸流量)会随着加热功率的增大而增大。

表 6 根据相似准则由模型实验数据推算得到的
原型电子烟雾化结果

Tab. 6 The prototype electronic cigarette experiment results
derived from model experimental data based on similarity criteria

功率 /W	平均每口气溶胶 总粒相物 /mg	烟油平均汽化 速率 /(mg/s)	气溶胶平均质 量浓度 /(g/m ³)
1.34	0.247	0.003	0.179
2.18	1.827	0.024	1.328
3.60	14.373	0.192	10.453
4.70	27.433	0.366	19.952
6.69	72.800	0.971	52.945

2.4 不同加热功率条件下的温度变化规律

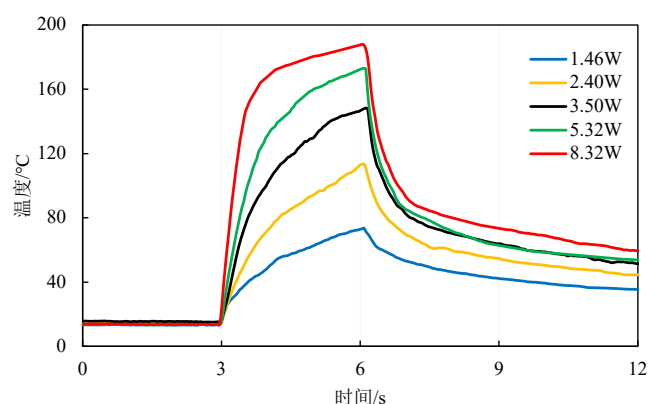
针对纯 PG、纯 VG、PG:VG=1:1(vol) 三种烟油在不同加热功率条件下的电加热丝温度随时间的变化特性, 分别如图 6 (a)、(b)、(c) 所示。由图分析可知, 对于任意配比的烟油液体, 电子烟加热功率越大, 电加热丝的温升速率越快, 经过相同加热时间后其达到的温度值也越高。当高功率电子烟停止加热后, 雾化芯与周围环境间的温差作用也相对越大, 其温降速率也越快, 但其温度数值还是会比低功率工况来得高, 且两种工况间电加热丝的温差大小会随时间逐渐减小, 最终都会趋近于周围环境温度。

当电子烟增大加热功率后, 雾化温度升高, 烟油汽化量增大, 可以显著提升烟雾量效果, 但与此同时, 高温会加剧烟油热解生成羰基化合物^[9]。

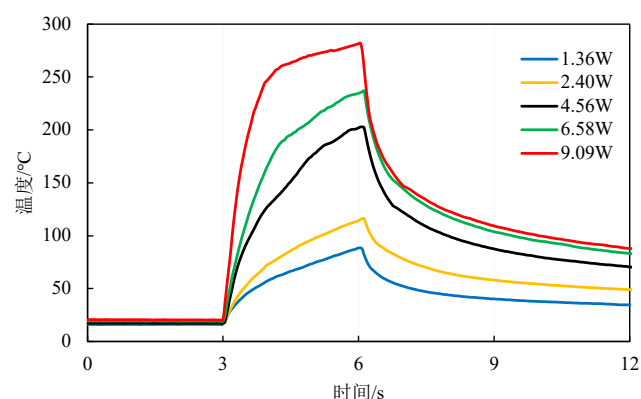
3 结论

本研究基于相似原理设计搭建电子烟扩尺实验台, 通过扩尺实验台进行模型实验研究, 可根据各物理量间的相似准则从模型实验数据推算出原型电子烟数据。相似扩尺实验台可以方便有效地测试电子烟雾化芯的温度变化特性, 为电子烟的科学研究提供一种新方法。

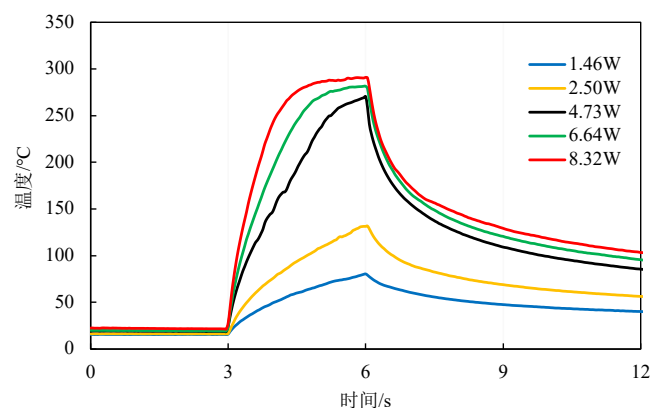
研究表明: (1) 在相同加热功率及抽吸模式条件下, 纯 VG 的温升速率高于纯 PG, 电加热丝温升速率会随着烟油中 VG 含量的增大而提高; (2) 雾化芯中, 加热丝的温升速率最快, 加热丝与导油棉交界处温升速率次之, 棉中心位置最慢; (3) 在三口连续抽吸实验中, 每口抽吸过程中各温度测点的初始及最高温度会随抽吸口数呈整体抬升趋势, 且随着加热功率的增大, 平均每口气溶胶总粒相物、烟油平均汽化速率、气溶胶平均质量浓度会随之增大。



(a) 烟油: PG



(b) 烟油: PG:VG=1:1(vol)



(c) 烟油: VG

图 6 三种烟油在不同加热功率条件下的电加热丝温度变化特性 (抽吸流量: 18.33 mL/s, 加热时间: 3 s)

Fig. 6 The temperature variation characteristics of coil under different heating powers for three types of e-liquids (puffing flow rate: 18.33 mL/s, puffing time: 3 s)

参考文献

- [1] 洪群业, 郑路, 刘亚丽, 等. 国内电子烟专利技术分析 [J]. 烟草科技, 2019, 52(03): 74-85.
HONG Qunye, ZHENG Lu, LIU Yali, et al. Technological analysis of patents related to e-cigarettes in China. Tobacco Science & Technology, 2019, 52(3): 74-85.

- [2] 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(02): 100-110.
LI Lei, ZHOU Ningbo, QU Xianghui, et al. Market development and regulation of novel tobacco products [J]. Acta Tabacaria Sinica, 2018, 24(02):100-110.
- [3] 李保江. 全球电子烟市场发展、主要争议及政府管制 [J]. 中国烟草学报, 2014, 20(4): 101-107.
LI Baojiang. A global perspective on electronic cigarette's future development and related controversial and regulatory issues[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2014, 20(4): 101-107.
- [4] Trtchounian A, Williams M, Talbot P. Conventional and electronic cigarettes (e-cigarettes) have different smoking Characteristics[J]. Nicotine and Tobacco Research, 2010, 12(9): 905-912.
- [5] Glasser A M, Collins L, Pearson J L, et al. Overview of Electronic Nicotine Delivery Systems: A Systematic Review[J]. American Journal of Preventive Medicine, 2017, 52(2): e33-e66.
- [6] El Dib R, Suzumura E A, Akl E A, et al. Electronic nicotine delivery systems and/or electronic non-nicotine delivery systems for tobacco smoking cessation or reduction: a systematic review and meta-analysis[J]. BMJ Open, 2017, 7(2): e012680.
- [7] Glantz S A. E-Cigarettes: Use, Effects on Smoking, Risks, and Policy Implications[J]. Annual Review of Public Health, 2018, 39(1).
- [8] Flora J W, Wilkinson C T, Wilkinson J W, et al. Method for the Determination of Carbonyl Compounds in E-Cigarette Aerosols[J]. Journal of Chromatographic Science, 2017, 55(2): 142-148.
- [9] Geiss O, Bianchi I, Barrero-Moreno J. Correlation of volatile carbonyl yields emitted by e-cigarettes with the temperature of the heating coil and the perceived sensorial quality of the generated vapours[J]. International Journal of Hygiene & Environmental Health, 2016, 219(3): 268-277.
- [10] Williams M, Villarreal A, Bozhilov K, et al. Metal and silicate particles including nanoparticles are present in electronic cigarette cartomizer fluid and aerosol[J]. Plos One, 2013, 8(3):e57987.
- [11] Zhao T, Shu S, Guo Q, et al. Effects of design parameters and puff topography on heating coil temperature and mainstream aerosols in electronic cigarettes[J]. Atmospheric Environment, 2016, 134: 61±9.
- [12] Chen W, Wang P, Kazuhide I, et al. Measurement of heating coil temperature for e-cigarettes with a “top-coil” clearomizer [J]. PLOS ONE, 2018, 13(4): e0195925.
- [13] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 (第四版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat Transfer (The Fourth Edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.

Similarity experiment on temperature characteristics of e-cigarette and establishment of scaled-model experimental platform

LI Dian¹, GAO Yihan², LI Zhihua¹, WU Jinlu³, YANG Muyun³, GAO Naiping³, XIE Yan^{*2}, LU Li^{*1}

¹ China Tobacco Guangxi Industrial Co., Ltd, Nanning 530001, China;

² Shanghai New Tobacco Product Research Institute, Shanghai 200082, China;

³ Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: [Objective] A novel method for collecting the experimental parameters of electronic cigarette was proposed. [Method] Based on the similarity principle, a scaled-model experimental platform was designed. The similarity experiments were carried out with various e-liquids composed of propylene glycol (PG) and vegetable glycerol (VG) in different ratios. According to the similarity criteria of physical parameters, the scaled-model simulation results can be converted into the experimental results of prototype electronic cigarettes. [Results] (1) Under the same heating power and suction mode, the temperature rise rate of coil for VG was faster than that for PG. The temperature rise rate of coil would increase with the VG content in e-liquid. (2) The temperature rise rate of coil in atomizing core was the fastest among all measuring points, and follow by that at the interface position between coil and cotton, and that at the center of wick was the slowest. (3) During the consecutive puffing process, the initial temperature and maximum temperature of each puffing would increase with puff number.

Keywords: electronic cigarette; temperature characteristics; scaled-model experimental platform; similarity experiment

*Corresponding author. Email: xiey@sh.tobacco.com.cn; 44733983@qq.com