華東理工大學学报 自然科学版 Natural Science Edition
JOURNAL OF EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

周向加热卷烟传热过程模拟研究

曾俊杰 晁超越 刘义波 李奕川 吴泽林 汪双凤 陈凯 李峰

Simulation on Heat Transfer Process of Circumferential Heated Tobacco Products

ZENG Junjie, CHAO Chaoyue, LIU Yibo, LI Yichuan, WU Zelin, WANG Shuangfeng, CHEN Kai, LI Feng

在线阅读 View online: http://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20251120001

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

加热卷烟制品传热与烟气流动过程数值模拟

Numerical Simulation of Heat Transfer and Smoke Flow of Heated Cigarette Product

华东理工大学学报（自然科学版）. 2021, 47(1): 35-40 http://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20191029004

用于加热卷烟的石蜡改性二醋酸纤维素降温滤嘴的制备与表征

Preparation and Characterization of Paraffin Modified Cellulose Diacetate Cooling Filter for Heated Tobacco Product

华东理工大学学报（自然科学版）. 2024, 50(3): 377-382 http://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20230324001

PEG/CDA膜状复合降温材料的制备及其在加热卷烟中的应用

Preparation of PEG/CDA Membrane Composite Cooling Material and Its Application in Heated Tobacco Product

华东理工大学学报（自然科学版）. 2025, 51(6): 748-756 http://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20250115003

脱油沥青进料的气化炉火管废锅中动态灰分沉积与传热特性的数值模拟

Numerical Simulation of Dynamic Ash Deposition and Heat Transfer Characteristics in Gasification Firetube Waste Boiler Fed with Deoiled Asphalt

华东理工大学学报（自然科学版）. 2025, 51(2): 175-186 http://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20240313001

气态烃非催化部分氧化烧嘴端面传热过程研究

Heat Transfer of Burner Rim in Gas Hydrocarbon Non-catalytic Partial Oxidation Process

华东理工大学学报（自然科学版）. 2021, 47(1): 11-16 http://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20191024001

管道内高温合成气喷雾激冷过程数值模拟研究

Numerical Simulation of Spray Shock Chilling Process of High Temperature Syngas in the Pipeline

华东理工大学学报（自然科学版）. 2021, 47(2): 154-162 http://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20191207001

扫码关注公众号，获取更多信息！

文章编号：1006-3080(2026)04-0489-10 DOI：10.14135/j.cnki.1006-3080.20251120001

周向加热卷烟传热过程模拟研究

曾俊杰[1]， 晁超越[1]， 刘义波[1]， 李奕川[1]， 吴泽林[1]， 汪双凤[2]， 陈 凯[2]， 李 峰[1]
（1. 广东中烟工业有限责任公司技术中心，广州 510385；2. 华南理工大学传热强化与过程节能教育部重点实验室，广州 510640）

摘要：针对周向加热卷烟的传热过程，建立发热元件-加热卷烟的传热模型，通过数值模拟计算得到加热卷烟的温度场，并探究其随时间的变化规律；进一步分析发热元件-空气层-卷烟纸-烟丝的传热过程，计算加热卷烟系统中各部分的热量接收情况。结果表明，数值模拟结果与实验结果基本一致，各点平均相对偏差最大值仅为2.8%；只有11.9%的热量经发热元件传递至卷烟纸表面，仅8.1%的热量被烟草段吸收。本文建立的数值模型可以较准确地预测周向加热卷烟的温度分布，并明确该类加热卷烟的传热过程和能量利用效率。

关键词：加热卷烟；发热元件；数值模拟；传热过程；能量

中图分类号：TK11 **文献标志码：**A

加热卷烟产品由加热卷烟和加热器具组成。按照加热器具发热元件的结构形态，产品主要分为针式、片式和周向加热3类。它们的工作原理一致：通过发热元件加热烟草产生气溶胶，同时将加热温度控制在特定区间（远低于烟草制品点燃温度），以便卷烟释放目标挥发性化合物[1-2]。有研究[3]表明，当加热卷烟烟丝被加热至260~320 ℃时，烟碱、丙二醇和丙三醇释放特性较佳。而加热卷烟受热过程伴随着热量传递和物质释放，属于复杂的流动传热传质过程，该过程与加热器具发热元件的发热特性、加热卷烟的物理性质密切相关，难以仅凭实验手段探明其内在规律[4-6]。

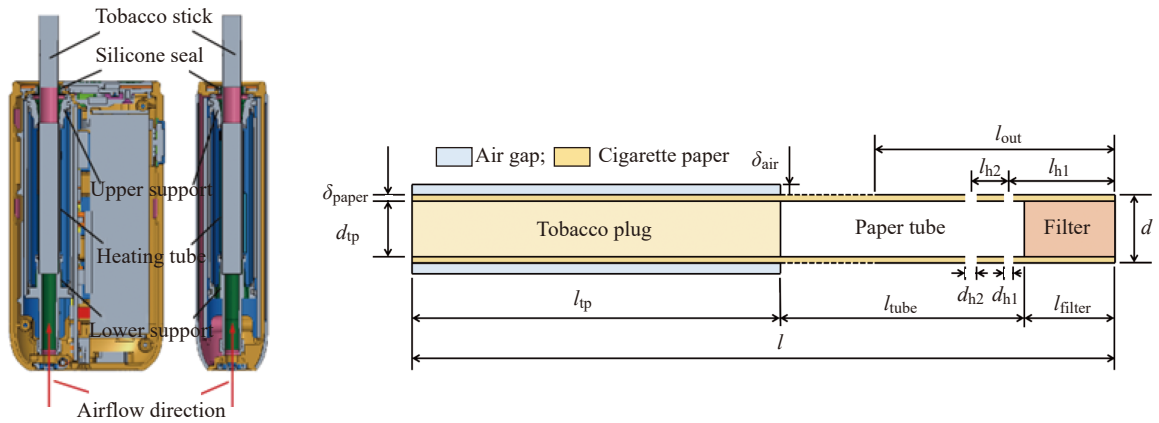
目前，许多学者采用数值仿真方法研究加热卷烟产品温度及释放特性。孙志伟等[7]和魏信建等[8]通过数值模拟研究了电阻式加热器具发热元件的温度场分布和组件结构对发热特性的影响。时春鑫等[9]通过数值模拟建立中心片状加热元件的热-电耦合状态三维模型，研究不同工作状态下加热元件的温度变化规律。王乐等[10]建立了加热卷烟烟芯关键成分的传热传质数学模型，并利用模型对烟芯关键成分逐口释放规律进行研究。肖卫强等[11]建立了外围加热的加热卷烟在加热和抽吸模式下的烟气流动传热数学模型，发现烟气流动对温度分布影响较小。现有的数值模拟研究主要侧重于发热元件发热特性和加热卷烟关键物质（水分、丙三醇和烟碱等）释放等，而对发热元件-加热卷烟的传热过程鲜有报道。为此，本文选择市面某款周向加热产品作为研究对象，建立加热卷烟传热过程的数学模型，并采用数值模拟方法得到加热卷烟温度分布随时间的变化规律，进而分析周向加热发热元件-卷烟纸-烟丝间的传热过程，明确该类加热卷烟的传热过程和能量利用效率。

1 发热元件-加热卷烟传热模型建立

1.1 物理模型

市面某款周向加热卷烟产品的发热元件与加热卷烟的尺寸、相对位置简图见图1，参数如表1所示。烟支按使用说明插入发热元件后，下支架和夹持硅胶起固定及相对密封作用，故认为抽吸时气流

收稿日期：2025-11-20
基金项目：中国烟草总公司重大专项（110202101073（XX-18））
作者简介：曾俊杰（1990—），男，广东惠州人，硕士，工程师，主要研究方向为电子产品、新型烟草领域。E-mail：zengjj@gdzygy.com
通信联系人：李 峰，E-mail：lif@gdzygy.com
引用本文：曾俊杰，晁超越，刘义波，等. 周向加热卷烟传热过程模拟研究 [J]. 华东理工大学学报（自然科学版），2026，52(4)：489-498.
Citation：ZENG Junjie，CHAO Chaoyue，LIU Yibo，*et al*. Simulation on Heat Transfer Process of Circumferential Heated Tobacco Products[J]. Journal of East China University of Science and Technology，2026，52(4)：489-498.



d—Cigarette diameter; d_{tp}—Tobacco plug diameter; d_{h1}—First-row opening diameter; d_{h2}—Second-row opening diameter; δ_{paper}—Cigarette paper thickness; δ_{air}—Air gap thickness; l—Cigarette length; l_{tp}—Tobacco plug length; l_{tube}—Paper tube length; l_{filter}—Filter length; l_{out}—Exposed part length; l_{h1}—First-row opening to outlet distance; l_{h2}—Opening row spacing

图 1 (a)周向加热卷烟产品剖面图;(b)发热元件与加热卷烟尺寸、相对位置简图

Fig. 1 (a) Sectional view of a circumferentially heated tobacco product; (b) Dimensions and relative position of the heating element and heated tobacco product

表 1 发热元件及加热卷烟尺寸参数

Table 1 Parameters of heating element and heated tobacco product (Unit: mm)

d	d_{tp}	d_{h1}	d_{h2}	δ_{paper}	δ_{air}	l	l_{tp}	l_{tube}	l_{filter}	l_{out}	l_{h1}	l_{h2}
5.40	5.31	0.18	0.28	0.05	0.10	72.00	42.00	23.00	7.00	20.00	12.00	1.50

由器具底部的进气孔经下支架进入烟草段。

1.2 数学模型

1.2.1 控制方程 根据图 1 和表 1,建立发热元件-加热卷烟几何模型。鉴于加热卷烟沿中心轴呈旋转对称结构,本文选取二维计算域,计算域包括发热元件内壁与卷烟纸间的空气层、烟草段、空纸管段和滤嘴段,如图 2 所示。

抽吸启动前存在 25 s 预热,该阶段烟草段内固相与气相温差较小。本文重点研究热量从发热元件向烟丝传递的分布规律,不考虑烟草内部微观反应,因此引用文献中的局部热平衡模型对加热卷烟的流动传热过程进行求解[11]。模型假定:烟草段与滤嘴为各向同性多孔介质,抽吸气流视作不可压缩空气,气体密度、黏度为定值,不随温度改变,流体遵循多孔介质流动传热控制方程。此外,空气体积热容远低于多孔固相材料,因此烟草段、滤嘴与气相之间采用局部热平衡假设。由于多孔介质固体颗粒间温度差异微弱,忽略多孔域内部辐射换热。

发热元件内壁与卷烟纸之间的空气层传热满足单向流动传热方程,如式(1)~(4)所示:

$$\frac{\partial \rho_{air}}{\partial t}+\rho_{air}\nabla \boldsymbol{u}=0 \tag{1}$$

$$\rho_{air}\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t}+\rho_{air}\boldsymbol{u}\cdot\nabla\boldsymbol{u}=-\nabla p+\nabla\cdot(\mu_{air}\nabla\boldsymbol{u})+\rho_{air}\alpha_v\boldsymbol{g}(T-T_0) \tag{2}$$

$$\rho_{air}c_{p,air}\frac{\partial T}{\partial t}+\rho_{air}c_{p,air}\boldsymbol{u}\cdot\nabla T=\nabla\cdot(\lambda_{air}\nabla T) \tag{3}$$

$$\nabla\cdot(I(\boldsymbol{r},\boldsymbol{s})\boldsymbol{s})+(a+\sigma_s)I(\boldsymbol{r},\boldsymbol{s})=an^2\frac{\sigma T^4}{\pi}+\frac{\sigma_s}{4\pi}\int_0^{4\pi}I(\boldsymbol{r},\boldsymbol{s}')\boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{s},\boldsymbol{s}')\mathrm{d}\Omega' \tag{4}$$

其中,ρ_{air} 为空气密度;t 为时间;$\boldsymbol{u}$ 为气体在多孔介质和自由区域中的表观速度;p 为压力;μ_{air} 为空气

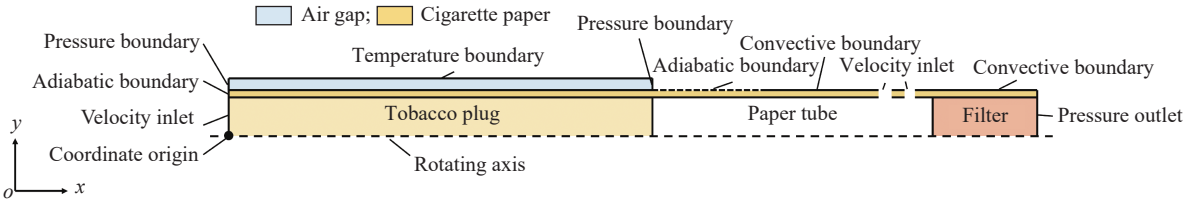


图 2 加热卷烟几何模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of heated tobacco product geometric model

动力黏度; α_v 为空气热膨胀系数; $c_{p,air}$ 为空气比热容; T 为温度; λ_{air} 为空气热导率; I 为辐射强度; $\boldsymbol{s}'$为空间位置向量 (x, y, z); $I(\boldsymbol{r},\boldsymbol{s})$ 为位置 $\boldsymbol{r}$ 处散射方向 $\boldsymbol{s}$ 上的散射辐射强度; a 为吸收系数, 取值为 0; σ_s 为散射系数, 取值为 0; n 为折射率, 取值为 1; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼辐射常数, 其值为 5.67×10^{-8} W/(m^2·K^4); $\Phi(\boldsymbol{s},\boldsymbol{s}')$ 为散射后辐射传播的方向向量; $\mathrm{d}\Omega'$为立体角元素, 用于积分所有可能的散射方向。

烟丝中水分和丙三醇含量较大[12], 因受热释放组分而造成的热量变化仅需考虑水分和丙三醇的蒸发吸热效应。王乐等[10] 采用化学反应模型和对流传质模型, 对比了各种组分释放的模拟结果与实验结果的偏差, 发现水分释放时采用对流传质模型的偏差最小, 甘油释放时采用化学反应模型的偏差最小。因此, 本文中水分释放时采用对流传质模型, 甘油释放时采用化学反应模型。烟草段内多孔介质流动传热遵循对应的控制方程, 见式(5)~(8); 水分和丙三醇蒸发吸热方程见式(9)~(11); 空纸管段内气体满足单相对流传热方程, 见式(12)~(14); 滤嘴段满足多孔介质流动传热方程, 见式(15)~(18)。

$$\frac{\partial(\gamma_{tp}\rho_{gas})}{\partial t}+\gamma\rho_{gas}\nabla\cdot\boldsymbol{u}=0 \tag{5}$$

$$\gamma_{tp}\rho_{gas}\frac{\partial\boldsymbol{u}}{\partial t}+\gamma_{tp}\rho_{gas}\boldsymbol{u}\cdot\nabla\boldsymbol{u}=-\gamma_{tp}\nabla p+\gamma_{tp}\nabla\cdot(\mu_{gas}\nabla\boldsymbol{u})-f_{tp} \tag{6}$$

$$(\gamma_{tp}\rho_{gas}c_{p,gas}+(1-\gamma_{tp})\rho_{tp}c_{p,tp})\frac{\partial T}{\partial t}+\rho_{gas}c_{p,gas}\boldsymbol{u}\cdot\nabla T=\nabla\cdot(\gamma_{tp}\lambda_{gas}+(1-\gamma_{tp})\lambda_{tp}\nabla T)+S_v \tag{7}$$

$$f_{tp}=\frac{\mu_{gas}}{\alpha_{tp}}\boldsymbol{u}+\frac{C_{tp}}{2}\rho_{gas}|\boldsymbol{u}|\boldsymbol{u} \tag{8}$$

$$S_v=\Delta H_w\frac{\mathrm{d}m_w}{\mathrm{d}t}+\Delta H_g\frac{\mathrm{d}m_g}{\mathrm{d}t} \tag{9}$$

$$\frac{\mathrm{d}m_w}{\mathrm{d}t}=-h_w(m_w-m_{w,inf}) \tag{10}$$

$$\frac{\mathrm{d}m_g}{\mathrm{d}t}=-A\mathrm{e}^{-\frac{E}{RT}}(m_g-m_{g,inf}) \tag{11}$$

$$\frac{\partial\rho_{gas}}{\partial t}+\rho_{gas}\nabla\cdot\boldsymbol{u}=0 \tag{12}$$

$$\rho_{gas}\frac{\partial\boldsymbol{u}}{\partial t}+\rho_{gas}\boldsymbol{u}\cdot\nabla\boldsymbol{u}=-\nabla p+\nabla\cdot(\mu_{gas}\nabla\boldsymbol{u}) \tag{13}$$

$$\rho_{gas}c_{p,gas}\frac{\partial T}{\partial t}+\rho_{gas}c_{p,gas}\boldsymbol{u}\cdot\nabla T=\nabla\cdot(\lambda_{gas}\nabla T) \tag{14}$$

$$\frac{\partial(\gamma_f\rho_{gas})}{\partial t}+\gamma_f\rho_{gas}\nabla\cdot\boldsymbol{u}=0 \tag{15}$$

$$\gamma_f\rho_{gas}\frac{\partial\boldsymbol{u}}{\partial t}+\gamma\rho_{gas}\boldsymbol{u}\cdot\nabla\boldsymbol{u}=-\gamma_f\nabla p+\gamma_f\nabla\cdot(\mu_{gas}\nabla\boldsymbol{u})-f_f \tag{16}$$

$$(\gamma_f\rho_{gas}c_{p,gas}+(1-\gamma_f)\rho_f c_{p,f})\frac{\partial T}{\partial t}+\rho_{gas}c_{p,gas}\boldsymbol{u}\cdot\nabla T=\nabla\cdot(\gamma_f\lambda_{gas}+(1-\gamma_f)\lambda_f\nabla T) \tag{17}$$

$$f_f=\frac{\mu_{gas}}{\alpha_f}\boldsymbol{u}+\frac{C}{2}\rho_{gas}|\boldsymbol{u}|\boldsymbol{u} \tag{18}$$

其中, ρ_{gas} 为烟气密度; μ_{gas} 为烟气动力黏度; $c_{p,gas}$ 为烟气比热容; γ_{tp} 为烟草段孔隙率; f_{tp} 为烟草段流动阻力项; ρ_{tp} 为烟草段固体相密度; $c_{p,tp}$ 为烟草段固体相比热容; λ_{tp} 为烟草段固体相热导率; S_v 为因烟丝受热释放组分造成的能量变化源项; α_{tp} 为烟草段渗透率; C_{tp} 为烟草段惯性阻力系数; ΔH_w 为水的蒸发焓; m_w 为烟丝中水的质量; ΔH_g为丙三醇的蒸发焓; m_g 为烟丝中丙三醇的质量; h_w 为烟丝与空气间水的传质系数; $m_{w,inf}$ 为最终时刻烟丝中剩余水的质量; A 为化学反应指前因子; E 为化学反应活化能; R 为气体常数, 为 8.314 J/(mol·K); $m_{g,inf}$ 为最终时刻烟丝中剩余丙三醇的质量; γ_f 为滤嘴段孔隙率; f_f 为滤嘴段流动阻力项; ρ_f 为滤嘴段固体相密度; $c_{p,f}$ 为滤嘴段固体相比热容; λ_f 为滤嘴段固体相热导率; α_f 为滤嘴段渗透率; C_f 为滤嘴段惯性阻力系数。

1.2.2　边界条件及计算参数设定　边界条件包括流动边界以及传热边界, 加热卷烟的几何模型示意图见图 2。

(1)流动边界　样品加热器具预热时间为 25 s; 加热卷烟内部温度测试采用 HCI(Health Canada Intense smoking regime)抽吸模式(抽吸容量 55 mL, 抽吸间隔 30 s, 抽吸持续 2 s); 钟形曲线; 抽吸口数为 7。设定模型的入口端及通风孔边界条件为速度入口, 实验测得通风孔流量与入口端流量相同, 2 s 内抽吸流量均为 27.5 mL; 滤嘴出口端边界条件为压力出口 $p=0$, 壁面为无滑移边界。烟支入口边界流速分布满足钟形分布, 本文采用正态分布来描述:

$$u=\frac{4q}{\pi d^2} \tag{19}$$

$$q=\begin{cases}0, & \text{Without suction}\\ \dfrac{1}{\sigma'\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{\{[t-30(x-1)-25]-1\}^2}{2\sigma'^2}}, & \text{With suction}\end{cases} \tag{20}$$

其中, q 为入口流量, mL/s; d 为加热卷烟直径; σ'为标准偏差; x 为抽吸次数; u 为流速。

(2)传热边界　入口处温度和发热元件内壁温度根据实验数据给定:

$$T=T(y,t) \tag{21}$$

发热元件内壁温度根据实验数据给定:

$$T=T(x,t) \tag{22}$$

其中，$T(y, t)$ 为不同时刻入口处的温度分布，时间间隔为 0.1 s；$T(x, t)$ 为不同时刻发热元件内侧(空气层外侧)的温度分布，时间间隔为 0.1 s。

空纸管段分为两部分，一部分插入加热器具中，另一部分外露。外露部分壁面与环境接触，设定为对流换热边界：

$$-\lambda_s \frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{n}} = h_t (T - T_\infty) \tag{23}$$

其中，$\boldsymbol{n}$ 为边界面的法向向量；h_t 为加热卷烟外露部分与环境空气的对流换热系数；T_∞为环境温度；λ_s 为滤嘴壁面导热系数。

滤嘴段壁面与环境接触，设定为对流换热边界，式(24)中 h_f 为滤嘴段壁面与环境空气的对流换热系数：

$$-\lambda_s \frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{n}} = h_f (T - T_\infty) \tag{24}$$

(3)计算参数设定　采用实验手段测得加热卷烟孔隙率、热物性参数和加热前后烟丝中水分、丙三醇的质量变化，其余参数采用参考文献中的取值，相关参数设置如表 2~表 4 所示。

表 2　空气物性参数[13]

Table 2　Physical properties of air[13]

ρ_{air}/(kg·m^{-3})	$c_{p,air}$/(J·kg^{-1}·K^{-1})	λ_{air}/(W·m^{-1}·K^{-1})	μ_{air}/(kg·m^{-1}·s^{-1})
1.186	1 006.43	0.024 2	$1.789\,4 \times 10^{-5}$

表 3　多孔介质物性参数

Table 3　Physical properties of porous media

Media	ρ/(kg·m^{-3})	c_p/(J·kg^{-1}·K^{-1})	λ/(W·m^{-1}·K^{-1})	γ	$1/\alpha$	C
Tobacco	379.6	2 433	0.368	0.635	2.93×10^9[14]	
Cellulose acetate	1 280[15]	1 704	0.073	0.640	2.38×10^9[16]	5.08×10^4[16]

C—Inertial resistance coefficient

表 4　水分、丙三醇蒸发吸热相关参数

Table 4　Latent heat of vaporization parameters for water and glycerol

Component	A/s^{-1}[4]	E/(kJ·mol^{-1})[10]	m_0/(mg·g^{-1})	m_{inf}/(mg·g^{-1})	ΔH/(J·kg^{-1})[10]
Water	2.04×10^{-3}	-	107.25	20.68	2.4×10^6
Glycerol	117.602	33.3	152.01	136.70	6.6×10^5

m_0—Initial mass of the component; m_{inf}—Residual mass of the component

2　测试方法

利用 Bruker 公司的 SKYSCAN 2214 型 CT 扫描设备获取加热卷烟的整体三维形貌，扫描模式选用螺旋扫描，分辨率设置为 10 μm。采用 AVIZO 软件进行图像处理和数据分析，计算加热卷烟烟丝段、滤嘴段的孔隙率。采用 METTLER TOLEDO公司的 DSC3 型差示扫描量热仪测定烟丝、卷烟纸的比热容；利用 NETZSCH 公司的 LFA467 型激光闪射法导热仪测定烟丝、卷烟纸的热扩散系数。通过样品密度、比热容、热扩散系数的乘积计算样品的导热系数。采用气相色谱方法分别检测加热卷烟加热前后烟丝中水和丙三醇的质量。采用 YOKOGAWA 公司的 WT310E 型数字功率计实时记录器具工作过程中发热元件的输入功率。采用 YOKOGAWA 公司的 GM90PS 型热电偶-数据采集仪测试系统测定发热元件内壁和加热卷烟内部温度分布。设置数据采集仪的采样频率为 100 ms，以加热卷烟底部为轴线原点，以加热卷烟中心作为径向原点，测定不同位置发热元件内壁及加热卷烟温度，测温点位置见图 3。

发热元件内壁温度测定：以聚酰亚胺(PI)管作为支撑，使热电偶与发热元件内壁贴合，并以第 1 次测量方向为原点，依次将 PI 管旋转 90°记录发热元件内部 4 个方向的温度，取算术平均值作为内壁温度。

加热卷烟内部温度测定：将热电偶探头折成“L”

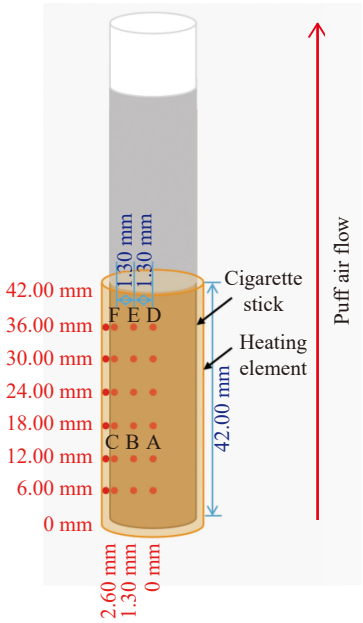


图 3　发热元件和烟支测温点示意图

Fig. 3　Schematic diagram of temperature monitoring points on heating elements and cigarette stick

形, 在卷烟纸外壁相应轴向位置打孔, 探头沿孔洞插入加热卷烟内部; 每个点重复测试 5 次, 结果取平均值。

3　计算结果及分析

3.1　数值模拟与实验结果对比

采用 Fluent 数值模拟软件求解控制方程, 得到加热卷烟内部温度随时间变化规律, 最终时刻加热卷烟内部温度场如图 4 所示。由图 4 可以看出, 烟草段沿轴向从 $x = 0$ 处起, 温度呈先升高后降低的变化趋势, 入口端温度最低, 中部温度最高。烟草段入口为气流进口, 环境空气温度低于烟丝受热温度, 冷空气对入口烟丝形成冷却效应; 加之入口段与加热段错开, 无直接热量输入, 因此烟草段入口附近温度偏低。空纸管段部分裸露于外界环境, 可通过对流换热向环境散热并冷却管内烟气, 致使烟草段临近空纸管的区域温度同样偏低。

图 5(a)示出了停止加热时刻(200 s)烟草段中心轴线(y=0)和壁面(y=2.65 mm)温度分布曲线, 从图中可以看出, 总体上壁面温度高于中心轴线温度。200 s 以后, 发热元件输入功率变为 0。在最终时刻(214 s), 中心轴线温度反而高于壁面温度(图 5(b))。这是因为, 停止加热后, 中心轴线和烟草段壁面均散热, 其中, 中心轴线附近烟草区域温度较高, 散热速率较慢; 而烟草段壁面附近空气温度较低, 主要通过导热和辐射向烟草段外的空气层散热, 散热速率较快, 烟草段壁面向空气层的散热速率大于中心轴线散热速率。

图 6 示出了不同测温点的温度实测值和模拟值, 图 6(a)~6(f) 分别对应图 3 中的测温点 A~F 的温度随时间变化曲线。整体来看, 各测温点模拟值与实测值的温度变化趋势基本吻合。在非抽吸阶段, 加热卷烟内部温度逐步上升; 开启抽吸后烟支温度快速下降, 抽吸终止后温度再度回升。全过程传热包括发热元件的加热过程、烟丝导热过程、烟气与烟

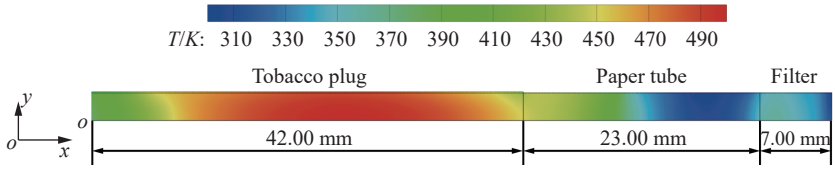


图 4　模拟所得最终时刻加热卷烟内部温度场

Fig. 4　Simulated internal temperature field of the heated tobacco product at final moment

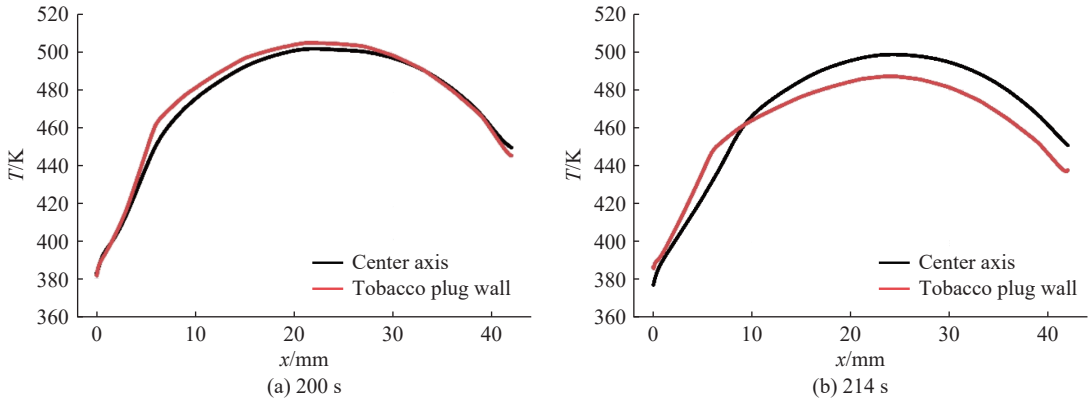


图 5　停止加热时刻及最终时刻烟草段中心轴线及壁面温度分布曲线

Fig. 5　Temperature distributions along the center axis and the tobacco plug wall at heating-off and final moment

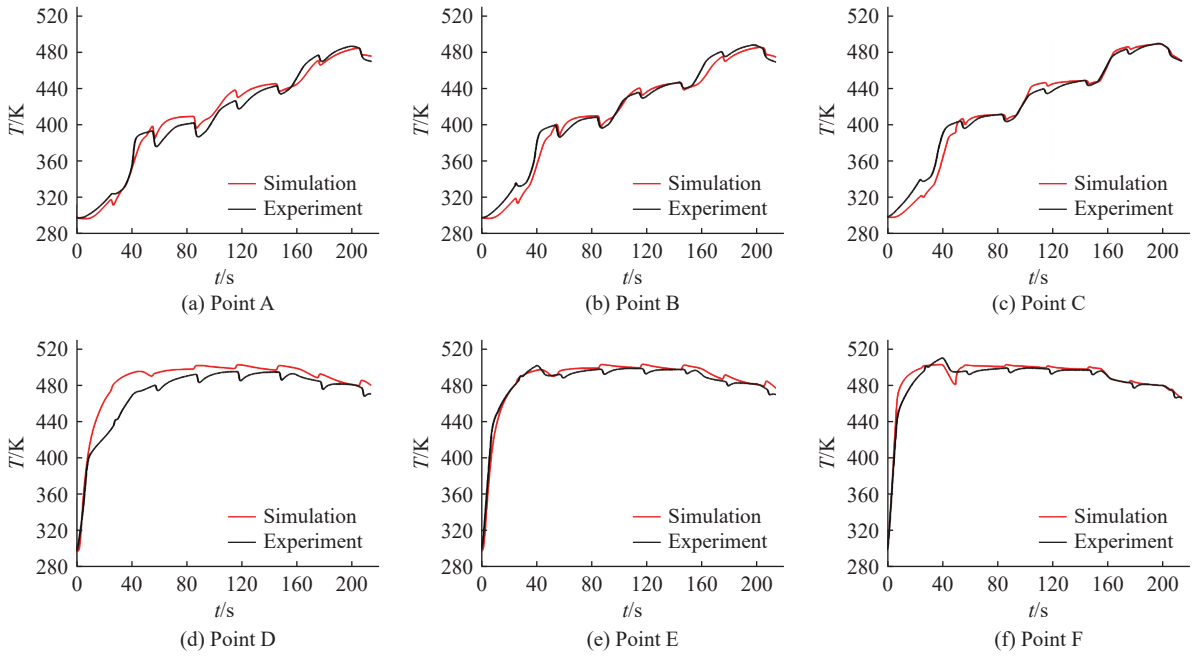


图 6 不同测温点的温度实测值和模拟值

Fig. 6 Measured and simulated temperature values at different temperature measurement points

丝的对流换热过程。其中,非抽吸阶段依靠发热元件持续加热烟丝,热量由烟草段外部凭借固体导热逐步向中心传递;在抽吸阶段,环境冷空气进入加热卷烟,卷烟内烟气开始流动,烟气与烟丝的对流冷却作用超过发热元件的加热效果,致使加热卷烟内部温度逐渐降低,直至抽吸结束。

偏差主要来源于烟草的常物性假设和多孔介质的均匀孔隙率假设,此外,局部热平衡模型忽略气固两相之间换热,也会带来一定的偏差。表 5 示出了各测温点模拟结果与实验结果的相对偏差,由图可知,各点的最大相对偏差为 10.5%,平均相对偏差最大值为 2.8%。从整体上看,数值模拟结果与实验结果吻合较好,偏差在合理范围内。因此,本文建立的局部热平衡数值模型可以较好地预测加热卷烟在加热过程中的内部温度变化情况。

表 5 各测温点模拟结果与实验结果的相对偏差

Table 5 Relative deviations between simulated and experimented results at temperature measurement points

Testing point	Maximum relative deviation/%	Average relative deviation/%
A	5.0	1.7
B	6.8	1.5
C	7.2	1.4
D	10.5	2.8
E	5.5	0.9
F	5.1	0.9

3.2 传热过程分析

3.2.1 发热元件-加热卷烟表面传热特性分析 发热元件向加热卷烟烟草段表面的传热过程如下:发热元件内部接收输入能量并产生热量,热量以导热方式从发热元件内部传递至元件内壁;元件内壁的热量通过导热、辐射、对流 3 种途径传递至发热元件与加热卷烟之间的空气(下文简称空气层);空气层经导热、辐射、对流 3 种途径,将热量传递至卷烟纸表面。因卷烟纸厚度很小,可将其视作均质固体,内部不存在对流传热与辐射传热。整个热量传递过程会产生部分能量损耗,损耗能量包含发热元件、空气层以及卷烟纸自身吸收的热量。

发热元件输入功率(P_{in})实测曲线如图 7 所示。发热元件输入的总能量的计算公式如下:

$$Q_{\text{in}} = \sum_{t} P_{\text{in}} \Delta t \tag{25}$$

其中,Q_{in} 为发热元件输入的总能量;Δt 为时间步长,即 0.1 s。

Q_{in} 最终转化为元件能量损耗(Q_{loss})、空气层吸收热量(Q_{air})和卷烟纸表面吸收热量($Q_{\text{paper,total}}$)3 部分。其中,空气层吸收的热量转化为空气层的热容量,因此,有如下计算公式:

$$Q_{\text{in}} = Q_{\text{loss}} + Q_{\text{air}} + Q_{\text{paper,total}} \tag{26}$$

$$Q_{\text{air}} = \rho_{\text{air}} c_{p,\text{air}} V_{\text{air}} (T_{\text{air,end}} - T_{\text{air,0}}) \tag{27}$$

其中,$T_{\text{air,end}}$ 为最终时刻空气层平均温度;$T_{\text{air,0}}$ 为初始时刻空气层平均温度,V_{air} 为空气层体积。

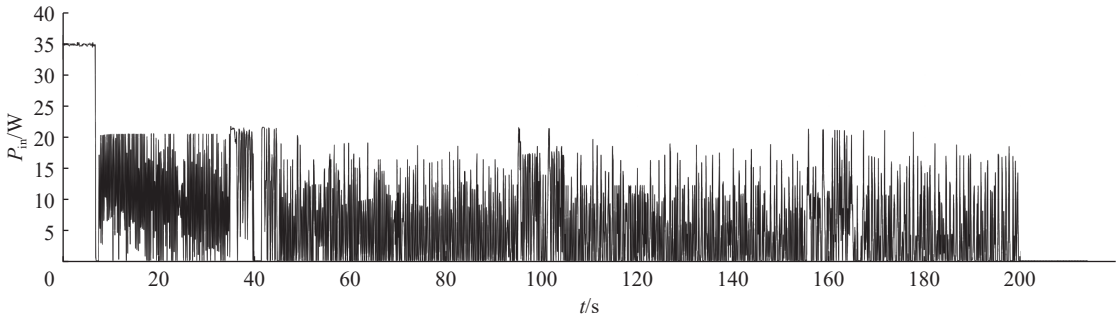


图 7　发热元件输入功率实测曲线

Fig. 7　Measured input power curve of the heating element

卷烟纸表面接收的热量包括通过空气层的传导热量($Q_{\text{paper,conduction}}$)、辐射换热量($Q_{\text{paper,radiation}}$)、对流换热量($Q_{\text{paper,convection}}$)3 部分, 同时也等于卷烟纸吸收热量($Q_{\text{paper}}$)和烟草段表面接收热量($Q_{\text{tp,conduction}}$)之和, 计算公式如下:

$$Q_{\text{paper,total}} = Q_{\text{paper,conduction}} + Q_{\text{paper,convection}} + Q_{\text{paper,radiation}} \tag{28}$$

$$Q_{\text{paper,total}} = Q_{\text{tp,conduction}} + Q_{\text{paper}} \tag{29}$$

卷烟纸表面接收的总辐射换热量计算如下:

$$Q_{\text{paper,radiation}} = \int_t \left\{ \int_{\text{A}} \left[\sigma \left(T_{\text{air}}^4 - T_{\text{paper}}^4 \right) - \frac{\sigma_{\text{s}}}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\boldsymbol{r}, \boldsymbol{s}') \Phi(\boldsymbol{s}, \boldsymbol{s}') \, \mathrm{d}\Omega' \right] \mathrm{d}A \right\} \mathrm{d}t \tag{30}$$

其中, T_{air} 为空气层温度; T_{paper} 为卷烟纸表面温度。卷烟纸表面接收的对流换热量等于空气自然对流带走的热量, 计算公式如下:

$$Q_{\text{paper,convection}} = \int_t \left[\rho_{\text{air}} c_{p,\text{air}} q_{\text{v}} (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) \right] \mathrm{d}t \tag{31}$$

卷烟纸吸收的热量转化为卷烟纸的热容量, 因此, 有:

$$Q_{\text{paper}} = \rho_{\text{paper}} c_{p,\text{paper}} V_{\text{paper}} (T_{\text{paper,end}} - T_{\text{paper,0}}) \tag{32}$$

其中, ρ_{paper} 为卷烟纸密度; $c_{p,\text{paper}}$ 为卷烟纸比热容; V_{paper} 为卷烟纸体积; $T_{\text{paper,end}}$ 为最终时刻卷烟纸平均温度; $T_{\text{paper,0}}$ 为初始时刻卷烟纸平均温度。

烟草段表面接收的热量转化为烟草段吸收的总热量(Q_{tp})、烟气对流换热散热量($Q_{\text{convection}}$)、入口端导热散热量($Q_{\text{conduction,in}}$)以及出口端导热散热量($Q_{\text{conduction,out}}$), 其中烟草段吸收总热量转化为烟草段热容量, 烟气对流换热量转化为烟气的热容量, 因此, 有:

$$Q_{\text{tp,conduction}} = Q_{\text{tp}} + Q_{\text{convection}} + Q_{\text{conduction,in}} + Q_{\text{conduction,out}} \tag{33}$$

$$Q_{\text{tp}} = \rho_{\text{tp}} c_{p,\text{tp}} V_{\text{tp}} (T - T_0) \tag{34}$$

$$Q_{\text{convection}} = \int_t \left[\rho_{\text{gas}} c_{p,\text{gas}} q_{V,\text{tp}} (T_{\text{out,tp}} - T_{\text{in,tp}}) \right] \mathrm{d}t \tag{35}$$

$$Q_{\text{conduction,in}} = \int_t \left[\int_{\text{A}} \left(-\lambda_{\text{tp}} \frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{n}} \right) \mathrm{d}A \right] \mathrm{d}t \tag{36}$$

$$Q_{\text{conduction,out}} = \int_t \left[\int_{\text{A}} \left(-\lambda_{\text{tp}} \frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{n}} \right) \mathrm{d}A \right] \mathrm{d}t \tag{37}$$

其中, ρ_{tp} 为烟草段密度; $c_{p,\text{tp}}$ 为烟草段比热容; T_0 为初始时刻烟草段温度; V_{tp} 为烟草段体积; q_{V} 为烟气流量; T_{out} 为烟草段空纸管端平均温度; T_{in} 为烟草段入口端平均温度。

加热卷烟系统内各部分热量统计如表 6 所示。可以看到, 发热元件输入的总能量为 1 465.40 J, 其中

表 6　加热卷烟系统各部分热量

Table 6　Energy of components within heated tobacco product system

Component	Mode	Energy/J	Percentage of energy/%
Heater input heat		1 465.40	100
Heater heat loss		1 290.89	88.1
Air gap absorption		0.01	0
Paper surface heat received	Conduction	165.89	11.3
	Radiation	8.58	0.6
	Convection	0.02	0

有 88.1% 的能量被损耗,仅有 11.9% 能量以热传递形式传至卷烟纸表面。在到达卷烟纸表面的热量中,通过热传导方式达到的热量为 11.3%,通过辐射传热方式达到的热量为 0.6%,对流传热基本忽略不计。由此可见,热量从发热元件通过空气层时,主要通过热传导的方式传递至卷烟纸表面。

图 8 所示为卷烟纸表面接收各部分热流量随时间的变化曲线。可以看到,卷烟纸表面接收的热量始终以热传导形式为主,在预热阶段时,卷烟纸表面接收的热量先迅速升高,后迅速下降;每次抽吸时卷烟纸表面接收的热量都会明显升高。结合图 7 可以发现,预热阶段开始时,发热元件输入功率较高导致输出热流量较大,发热元件及加热卷烟迅速升温;当发热元件内部温度达到预设值后,输入功率减小,所以卷烟纸表面接收的热流量减小;抽吸时,由于烟草段烟气的对流换热作用,加热卷烟温度降低,发热元件与加热卷烟间温差增大,因此发热元件向卷烟纸表面传热的热流量增大。

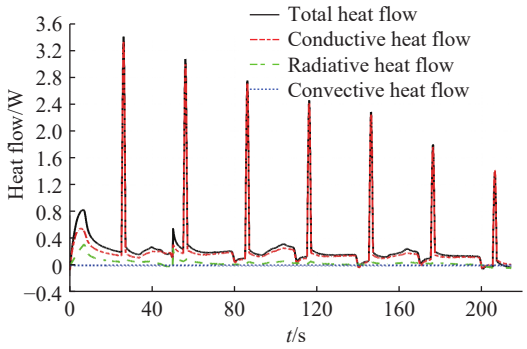


图 8 卷烟纸表面接收各部分热流量变化曲线

Fig. 8 Variation of heat flow absorbed by cigarette paper surface

对于空气层,通过计算格拉晓夫数(Gr)来进一步评估其自然对流的强度,Gr 是反映自然对流中浮升力与黏滞力之比的量纲为一常数,当 $Gr \leqslant 2860$ 时,竖直夹层内的热量主要依靠导热传递,可以忽略自然对流过程[14],其计算公式如下[14]:

$$Gr = \frac{\boldsymbol{g}\alpha_{\mathrm{V}}\left(T_{\mathrm{heater}} - T_{\mathrm{paper}}\right)\delta_{\mathrm{air}}^{3}}{\nu^{2}} \tag{38}$$

其中,$\boldsymbol{g}$ 为重力加速度;T_{heater} 为发热元件内壁的平均温度;T_{paper} 为卷烟纸表面的平均温度;ν 为空气的运动黏度。计算得到对应的 Gr 为 2.06×10^{-4},远小于受限空间自然对流发生的条件,因此空气层的自然对流基本可以忽略。

进一步对加热卷烟的传热过程进行热阻分析。空气层的导热过程视为一维导热,其导热热阻估算如下:

$$R_{\mathrm{conduction}} = \frac{A\Delta T}{Q_{\mathrm{conduction}}} = \frac{\delta_{\mathrm{air}}}{\lambda_{\mathrm{air}}} \tag{39}$$

经计算,$R_{\mathrm{conduction}}$ 为 $3.85\times10^{-3}(\mathrm{m}^2\cdot\mathrm{K})/\mathrm{W}$。

空气层之间的辐射过程也等效为一维情况,其等效热阻估算如下:

$$R_{\mathrm{radiation}} = \frac{A\Delta T}{Q_{\mathrm{radiation}}} = \left(\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{X} + \frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right) \Big/ \left(\sigma\left(T_1^2 + T_2^2\right)(T_1 + T_2)\right) \tag{40}$$

其中,T_1 和 T_2 分别为空气层内外表面的平均温度;X 为空气层内外表面之间的角系数;ε_1 和 ε_2 分别为空气层内外表面的发热率。假设 ε_1 和 ε_2 的值为 1,此时总热阻最小(表面热阻 $\left(\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right)$ 变为 0)。由于空气层很薄,仅为 0.1 mm,空气层内外表面近似为平行平板,X 为 1;根据计算结果,T_1 和 T_2 分别为 449.54 K 和 444.90 K。因此,得到辐射等效热阻为 $4.93\times10^{-2}\ (\mathrm{m}^2\cdot\mathrm{K})\ /\mathrm{W}$。

由于辐射的等效热阻远大于导热的等效热阻,因此认为辐射换热热量远小于传导热量,发热元件的热量主要通过热传导的方式传递到加热卷烟表面。

3.2.2 加热卷烟内部传热特性分析 烟草段内部传热过程如下:热量传递至烟草段表面后,一部分被烟体吸收;一部分经烟气对流换热随烟气流出;一部分从烟草段入口以导热形式向环境散失;剩余部分由烟草段出口通过导热向空纸管段传递。

同理,可计算得到烟草段的 Gr 为 491,故烟草段的自然对流可以忽略。此外,由于烟草段内部温度较低,孔隙表面温差较小,辐射作用较小;同时烟草段内部多孔介质结构复杂,对辐射的散射效应较大,因此烟草段内部的辐射传热基本可以忽略。进一步计算加热卷烟内部各部分热量比例,结果如表 7 所示。可以看出,传递至卷烟纸表面的 11.9% 热量中,0.5% 的热量被卷烟纸吸收,11.4% 的热量传至烟草段表面。传递至烟草段表面的 11.4% 热量中,8.1% 的热量被烟草段吸收,1.6% 的热量通过抽吸对流换热被烟气带走,1.7% 的热量经烟草段上下两端向外传递。

图 9 所示为烟草段内各部分热流量随时间变化曲线。可以看到,传递至烟草段表面的热量大部分被烟草段吸收;每次抽吸时,烟气与烟草段之间发生对流换热,烟草段释放热量,将热量传递给烟气,且抽吸时对流换热量可达到同时期传导热量的数倍。

表 7　加热卷烟系统烟草段各部分热量

Table 7　Energy of the tobacco plug within heated tobacco product system

Component	Mode	Energy/J	Percentage of energy/%
Heater input heat		1 465.40	100
Paper surface heat received		174.49	11.9
Paper heat absorption		7.92	0.5
Tobacco surface heat received	Tobacco heat absorption	118.57	8.1
	Air convective heat	23.90	1.6
	Inlet conductive heat	18.88	1.3
	Tube-end conductive heat	5.22	0.4

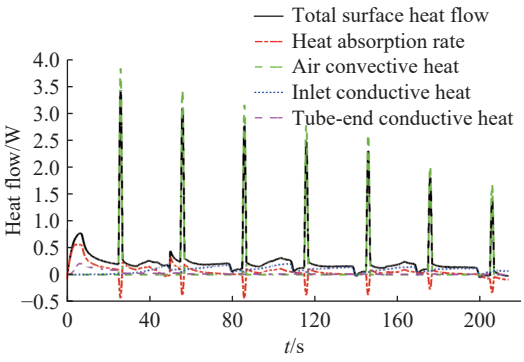


图 9　烟草段内各部分热流量变化曲线

Fig. 9　Variation of heat flow of tobacco plug

4　结束语

(1)本文建立的发热元件-加热卷烟传热模型的数值模拟结果与实验结果吻合较好, 测量点的最大相对偏差为 10.5%, 平均相对偏差最大值为 2.8%。

(2)发热元件输入的总能量为 1465.4 J, 其中 88.1% 的能量被损耗, 仅 11.9% 以热传递形式到达卷烟纸表面。热量由发热元件穿过空气层向卷烟纸表面传递时, 传热途径以热传导为主; 在传递至卷烟纸表面的 11.9% 热量中, 热传导贡献占 10.7%, 辐射传热占 0.6%, 对流传热可基本忽略。

(3)传递至卷烟纸表面的热量占比为 11.9%, 其中 0.5% 被卷烟纸吸收, 剩余 11.4% 传递至烟草段表面。传递至烟草段表面 11.4% 的热量中, 8.1% 的热量被烟草段吸收, 1.6% 的热量通过抽吸的对流换热被烟气带走, 1.7% 的热量通过烟草段上下两端向外传递。

未来可以考虑从以下几个方面提高能量利用效率: 对发热元件结构进行优化, 使加热更加均匀; 减小加热管壁厚度, 使用更高热导率、低比热容的材料, 降低能量发热元件部分的损耗; 提高卷烟纸的热导率, 减少卷烟纸部分的导热热阻。

参考文献:

[1] 刘义波, 王予, 曾静, 等. 电子烟电阻雾化技术研究进展 [J]. 中国烟草学报, 2023, 29(4): 105-115.

[2] 秦瑞琳, 李鹏, 任胜超, 等. 有机酸对无序烟丝型加热卷烟烟碱释放行为的影响 [J]. 烟草科技, 2023, 56(4): 41-46.

[3] 郑绪东, 李志强, 王程娅, 等. 不同加热温度下电加热不燃烧卷烟烟气释放特性研究 [J]. 安徽农业科学, 2018, 46(36): 168-171.

[4] 汪刚, 王雨青, 卜子晨, 等. 基于瞬态平面热源法的加热卷烟纸导热性能研究 [J]. 中国造纸, 2025, 44(1): 77-84.

[5] 张智轩, 李志强, 尹献忠, 等. 加热卷烟复合传热过程的数值模拟 [J]. 烟草科技, 2024, 57(2): 61-69.

[6] 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(4): 116-123.

[7] 孙志伟, 王威, 杜文, 等. 电加热型烟草制品加热体的电热模拟 [J]. 烟草科技, 2020, 53(9): 85-93.

[8] 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.

[9] 时春鑫, 郑绪东, 吴建德, 等. 加热卷烟加热元件温度场分析及试验研究 [J]. 烟草科技, 2020, 53(11): 89-96.

[10] 王乐, 王亚林, 李志强, 等. 电加热卷烟烟芯段温度分布和烟气关键成分逐口变化: 第 2 部分 模拟 [J]. 烟草科技, 2021, 54(6): 58-64.

[11] 肖卫强, 周国俊, 蒋健, 等. 加热卷烟制品传热与烟气流动过程数值模拟 [J]. 华东理工大学学报 (自然科学版), 2020, 47(1): 35-40.

[12] 高峄涵, 黄洁洁, 高洁, 等. 电加热卷烟传热传质和关键物质释放规律研究进展 [J]. 烟草科技, 2022, 55(8): 100-112.

[13] 陶文铨. 传热学 [M]. 第五版. 北京: 高等教育出版社, 2019.

[14] NORDLUND M, KUCZAJ A K. Modeling flow, heat and mass transfer in a porous biomass plug—when used in an electrically heated tobacco system[C/OL]//Sixth International Conference on Porous Media and Its Applications in Science, Engineering and Industry. New York, USA: Engineering Conferences International, 2016. https://dc.en-

gconfintl.org/porous_media_vi/19.

[15] ZHANG B, XIAO L, HUANG J, *et al*. Numerical study on heat transfer and release characteristics of key components in electrically heated tobacco products[J]. International Journal of Chemical Engineering, 2024, 1: 6690487.

[16] KIM S. H, CHOI H, JUNG Y, *et al*. Numerical analysis of the coupling between heat transfer and pyrolysis in heat-not-burn tobacco using computational fluid dynamics[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2022, 39(11): 2907-2915.

Simulation on Heat Transfer Process of Circumferential Heated Tobacco Products

ZENG Junjie[1], CHAO Chaoyue[1], LIU Yibo[1], LI Yichuan[1], WU Zelin[1], WANG Shuangfeng[2], CHEN Kai[2], LI Feng[1]

(1. Technology Center, China Tobacco Guangdong Industrial Co. Ltd, Guangzhou 510385, China;
2. Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation, Ministry of Education, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: For the heat transfer process of circumferentially heated tobacco products, a heat transfer model consisting of heating element and heated tobacco product was established. The temperature field of the heated tobacco product was calculated via numerical simulation, and its time-dependent evolution law was investigated. Furthermore, the heat transfer process across the heating element, air gap, cigarette paper and tobacco filler was analyzed, and the heat absorption of each component in the heating system was quantified. The results show that the numerical simulation data are basically consistent with experimental measurements, with the average maximum deviation merely 2.8%. Only 11.9% of the total heat transfers from the heating element to the outer surface of cigarette paper, and merely 8.1% is absorbed by the tobacco filler section. The numerical model proposed in this paper can accurately predict the temperature distribution of circumferentially heated tobacco products, and clarify the heat transfer mechanism and energy utilization efficiency of such heated tobacco products.

Key words: heated tobacco products; heating element; numerical simulation; heat transfer process; energy

（责任编辑：李娟）