

不同结构参量的红外透热烟具对颗粒型加热卷烟温度场及热解产物分布影响研究

李延岩¹, 王孝峰¹, 陈健², 赵锦花², 丁乃红³, 张晓宇¹, 曹芸¹, 管明婧¹, 周顺^{1,3*}

1. 安徽中烟工业有限责任公司 国家烟草专卖局(中国烟草总公司)燃烧热解研究重点实验室, 安徽 合肥 230088

2. 南京理工大学安全科学与工程学院 应急管理学院, 江苏 南京 210094

3. 安徽中烟工业有限责任公司 安徽省气溶胶解析调控及生物效应重点实验室, 安徽 合肥 230088

DOI:10.61369/ETQM.2025110004

摘 要 : 本研究采用 Fluent 数值模拟, 探究了四种结构参数对红外透热烟具颗粒型加热卷烟传热传质特性的影响。结果表明: 1) 增加烟具长度或减小内壁间距可减缓温度下降速率; 2) 较小间距或较短烟具使 60s 时烟具左端中心水蒸气分布更集中; 3) 较长烟具或较小间距促进 60s 时易挥发物质在左端中心富集; 4) 60–62s 抽吸时, 热气流右移导致定点温度先升至峰值后下降, 且峰值随烟具长度增加或间距减小而升高; 5) 定点处水蒸气和易挥发物质质量分数在 60s 达峰后因抽吸下降, 抽吸结束后因回流再次上升。研究为优化加热卷烟设计提供了理论依据。

关 键 词 : 加热卷烟制品; 数值模拟; 热解; 计算流体力学; Fluent

Effects of Infrared Heat-transparent Smoking Devices with Different Structural Parameters on the temperature Field and Pyrolysis Product Distribution of Granular-type Heated Cigarettes

Li Yanyan¹, Wang Xiaofeng¹, Chen Jian², Zhao Jinhua², Ding Naihong³, Zhang Xiaoyu¹, Cao Yun¹,
Guan Mingjing¹, Zhou Shun^{1,3*}

1. Key Laboratory of Combustion and Pyrolysis Research, China National Tobacco Corporation (State Tobacco Monopoly Administration), Anhui Zhongyan Industrial Co., Ltd., Hefei, Anhui 230088

2. School of Safety Science and Engineering, School of Emergency Management, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094

3. Anhui Provincial Key Laboratory of Aerosol Analysis, Regulation, and Biological Effects, Anhui Zhongyan Industrial Co., Ltd., Hefei, Anhui 230088

Abstract : This study employed Fluent numerical simulation to investigate the effects of four structural parameters on the heat and mass transfer characteristics of infrared-heated particulate heated tobacco products. The results demonstrate that: 1) Increasing the heater length or reducing the inner wall spacing slows the temperature decline rate; 2) Smaller spacing or shorter heaters lead to more concentrated water vapor distribution at the left-center region at 60s; 3) Longer heaters or smaller spacing promote volatile substance accumulation at the left-center region at 60s; 4) During 60–62s puffing, rightward airflow movement causes the temperature at fixed points to first peak then decline, with higher peaks observed with longer heaters or smaller spacing; 5) The mass fractions of water vapor and volatile substances at fixed points peak at 60s, decrease during puffing, then rise again due to reflux after puffing. This research provides theoretical foundations for optimizing heated tobacco product design.

Keywords : heated cigarette products; numerical simulation; pyrolysis; computational fluid dynamics; Fluent

传统烟草制品通过燃烧释放化学物质, 同时产生香味成分和有害成分^[1]。《烟草控制框架公约》的履约推动全球控烟行动, 许多国家实施了公共场所禁烟令^[2–3]。随着健康意识增强, 传统烟草消费下滑, 跨国烟草公司转向减害替烟的新型烟草制品^[4], 如加热卷烟、电子烟等^[5–7]。其中, 加热卷烟通过加热而非燃烧释放尼古丁^[8], 减少有害物质^[9–11], 因其减害、便捷等特性成为市场新宠^[12], 并被烟草

基金项目: 安徽中烟工业有限责任公司科研项目“科技创新平台重大科技项目”(202305a12020030)。

作者简介:

第一作者: 李延岩(1990.05.06—), 男, 汉族, 河南沁阳人, 研究生, 硕士, 工程师, 从事新型烟草制品研究。

通信作者: 周顺(1982—), 男, 博士, 研究员, 主要从事新型烟草制品和烟草燃烧化学研究。

公司列为长期战略目标^[13-14]。

加热卷烟的研究多集中于数值模拟。肖卫强等^[15]采用CFD方法研究烟丝加热和烟气流动；孙志伟等^[16]模拟电加热体温度分布并实验验证；王乐等^[17]建立多孔介质模型模拟抽吸温度分布；盛华权^[18]和黄鸿^[19]分别研究燃烧加热器的传热特性；刘成等^[20]汇总分析表明，现有研究多关注传热模拟和温度分布，但热源模拟、烟草热物性及烟气释放表征仍需完善。

目前，加热卷烟的结构参量对热流场影响的模拟较少。本文采用Fluent模拟四种不同结构参量（红外透热烟具长度、烟支间距）下的温度场及热解产物分布，优化设计参量，为颗粒型加热卷烟的红外透热烟具设计提供建议。

一、材料与方法

（一）材料

红外透热烟具与颗粒型加热卷烟产品，由安徽中烟工业有限责任公司提供。

1. 方法

（1）烟草颗粒热解反应动力学模型

本文将水分含量为10.88%，甘油含量为23.50%，粒径为1.51mm的烟草颗粒作为模拟对象，在Fluent中设定了烟草颗粒在加热时发生的反应。另外，本文以文献^[21]中的方法为依据，利用热重实验对烟草颗粒的热解特性进行了测试，并得到了烟草颗粒的3种分解产物，即：R1—蒸发的水分，R2—逸出的烟碱等易挥发物质^[22]，R3—释放的纤维素等大分子化合物的裂解产物^[23]。

接着，采用Freeman-Carroll法^[24]研究烟草颗粒的热分解动力学参数。通过对曲线数据计算，可以得到各个热解反应的反应级数、活化能、指前因子等动力学参数。所求得的热分解动力学参数如表1所示。

表1 各分解产物热解动力学参数

热解反应	反应级数 N	活化能 E (kJ · mol ⁻¹)	指前因子 A (min ⁻¹)	初始质量浓度 ρ ₀ (kg/m ³)
R1	1.3	22.1	3.8 × 10 ²	89
R2	1.6	75.8	2.9 × 10 ⁷	414
R3	1.7	180.6	5.8 × 10 ¹³	107

（2）几何模型构建

在红外透热烟具内，放置颗粒型加热卷烟，卷烟和红外透热烟具内留有空隙。红外透热烟具材质为石英玻璃，通过红外加热来使温度升高。管内的加热卷烟在高温下发生热解反应，水蒸气和烟碱等成分挥发，在烟支内部流动，被吸烟者吸入。红外透热烟具与颗粒型加热卷烟的模型如图1所示，加热卷烟结构示意图如图2所示。加热卷烟由纸包裹，内部分为颗粒段、阻隔段、降温段、过滤段与空腔段构成。其中颗粒段由烟草颗粒填充，阻隔段内为一固体，降温段和空腔段内皆为空气，过滤段内为醋酸纤维材料。红外透热烟具与加热卷烟之间的间隙为空气。

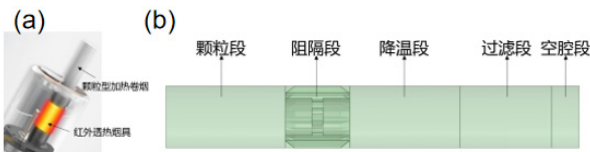


图1（a）红外透热烟具与颗粒型加热卷烟耦合模型；（b）颗粒型加热卷烟结构示意图

（3）几何模型网格无关性验证

研究采用包含1,310,000个网格单元的模型，旨在通过构建三种不同网格密度的配置（即500,000、1,310,000及2,540,000个网格单元）来进行网格无关性验证。在模拟过程中，迭代时间步长设定为0.01 s，且每一步的最大迭代次数限制为20次。如图2所示，该图呈现了三种不同网格密度下模型温度沿轴线分布的对比情况。通过观察分析，可以明确得出以下结论：当网格数量偏离1,318,810（即本模拟所采用的网格数量）时，无论是增加还是减少网格数量，均能达到与采用1,310,000个网格单元时相近的模拟效果。

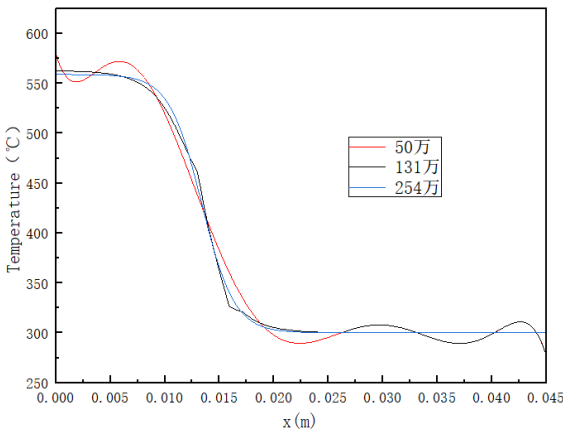


图2 不同网格数量与温度关系图

（4）四种不同结构参量下红外透热烟具及颗粒型加热卷烟的设计参数

四种不同结构参量下红外透热烟具及颗粒型加热卷烟的具体设计参数如表2所示。

表2 红外透热烟具及颗粒型加热卷烟模型参数

参数	数值 (mm)			
红外透热烟具长度	12	12	10	13
红外透热烟具壁厚	0.7	0.775	0.85	0.85
红外透热烟具内壁到加热卷烟间距	0.225	0.15	0.075	0.075
红外透热烟具外径	9.05			
红外透热烟具内径	7.35			
纸管壁厚	0.25			
加热卷烟长度	45			
颗粒段长度	13			
阻隔固体长度	7			
降温段长度	12			
过滤段长度	10			

(5) 传热机制

红外透热烟具的红外热管材质为石英玻璃, 根据图3石英玻璃的红外光谱图可以得知, 石英玻璃的红外强吸收峰为波长 $7.6\mu\text{m}$ 左右, 与之的相同相对辐射强度对应波长为 $10.0\mu\text{m}$ 左右。由维恩位移定律可知, 热辐射源产生的最大光谱辐射度的波长 λ_m 与温度 T 的关系为:

$$T\lambda_m = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

由于物质红外加热时应考虑非匹配吸收, 避开强吸收峰, 因此根据以上数据计算, 得出相应的加热温度为 300°C 左右。固红外透热烟具内和加热卷烟的空气初始温度设为 300K 。

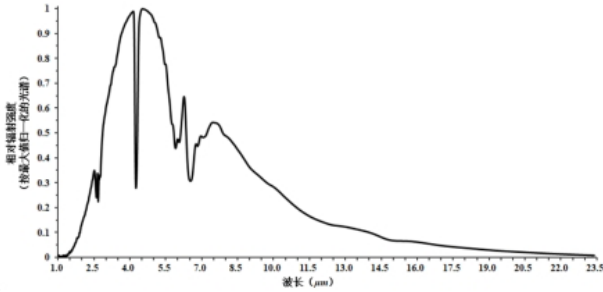


图3 石英玻璃红外光谱图

加热卷烟内部由颗粒段、阻隔段、降温段、过滤段与空腔段构成, 其中阻隔断为多孔介质, 满足多孔介质流动方程。如公式(1)所示:

$$\frac{\rho}{\epsilon_p} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = \nabla \cdot \left[-p\vec{I} + \frac{\mu}{\epsilon_p} (\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T) - \frac{2\mu}{3\epsilon_p} (\nabla \cdot \vec{u}) \vec{I} \right] - \left(\mu \kappa^{-1} + \beta_F |\vec{u}| + \frac{Q_m}{\epsilon_p^2} \right) \vec{u} + F$$

式中: ∇ 表示梯度算子; $\nabla \cdot$ 表示散度算子; ρ 代表流体密度, kg/m^3 ; \vec{u} 表示气体在多孔介质中的渗透速度, m/s ; P 代表系统压力, Pa ; Q_m 表示气体生成速率, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; μ 表示黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; κ 表示多孔介质的渗透率, m^2 ; ϵ_p 表示多孔介质的空隙率; ϵ_F 表示非线性参数; I 表示单位矩阵; F 表示体积力, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^2)$ 。

加热卷烟颗粒段、阻隔段、降温段与过滤段的传热采用气固两相局部相平衡传热模型, 假设烟支各个功能段与空气的热物性不随温度发生变化, 同时忽略残余水分和烟碱等其他物质的挥发吸热。传热方程如公式(2)所示:

$$(\rho C_p)_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho C_p)_g \vec{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \vec{q} = Q$$

$$\vec{q} = -k_{\text{eff}} \nabla T$$

式中: $(\rho C_p)_{\text{eff}}$ 表示多孔介质有效体积热容, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; $(\rho C_p)_g$ 表示空气体积热容, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; k_{eff} 表示多孔介质有效导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; Q 为热源项, W/m^3 ; q 表示热通量, W/m^2 。

加热卷烟烟具内部高分子聚合物之间的传热为固体传热, 传热方程如公式(3)所示:

$$(\rho C_p)_s \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{q} = Q$$

$$\vec{q} = -k_s \nabla T$$

式中: $(\rho C_p)_s$ 表示固体体积热容, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; k_s 表示固体导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

(6) 组分运输模型

由于本研究中的烟丝热解会生成水蒸气和烟碱等多种物质, 因此使用 Fluent 软件中的组分运输模型求解。组分运输模型的控制方程为:

$$\frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = - \nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (1)$$

$$\vec{J}_i = -\rho D_{i,m} \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T} \quad (2)$$

式中: Y_i —组分 i 占混合物的质量分数; \vec{v} —混合物的速度矢量; \vec{J}_i —组分 i 的扩散量; R_i —净产出速度; S_i —额外产出速度; $D_{i,m}$ —组分 i 质量扩散系数; $D_{T,i}$ —热量扩散系数; T —混合物温度。

(7) 数值模拟

在建模软件中建立红外透热烟具和加热卷烟组合产品的三维模型, 设置模拟参数时, 对流体域的参数, 以及流体域内的物质参数进行设置。本论文中需要设置颗粒加热卷烟内的流体区域各物性参数。各参数通过测量计算与验证实验获得。各流体域的物质参数具体见下表3所示。对于粘性阻力系数与惯性阻力系数, Fluent 帮助文档中提供了以下的计算公式:

$$\alpha = \frac{D^2}{150} \frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)^2} \quad (1)$$

$$C_2 = \frac{3.5}{D} \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \quad (2)$$

式中: α —渗透率, 粘性阻力系数的倒数; D —平均粒径(m); ϵ —多孔介质的孔隙率; C_2 —惯性阻力系数。

表3 加热卷烟颗粒段与过滤段参数设置

参数	烟草颗粒段	过滤段
密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	911	1
比热容 ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	1043	9.1×10^5
导热系数 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	0.3	0.23
孔隙率	0.52	0.72
粘性阻力系数	6.6×10^8	3.3×10^{10}
惯性阻力系数	1.9×10^4	8.5×10^4

抽吸模式按国际标准化组织的(ISO3308)模式进行设置, 35 mL 持续 2 s , 每 60 s 抽吸一次。红外透热烟具的壁温通过 Fluent 中的 expression 设置为从 0 至 25 s 内温度由 300 K 线性升高至 563 K 。加热卷烟和红外透热烟具的初始温度皆为 300 K 。如图4所示, 在红外透热烟具与加热卷烟内部烟支之间空隙两侧分别设为速度入口和压力出口, 加热卷烟内部烟支两侧分别设压力入口和压力出口。加热卷烟内部烟支入口温度设置与烟具一致。抽吸时抽吸口处的出口压力为 -900 Pa , 未抽吸时为 0 Pa 。

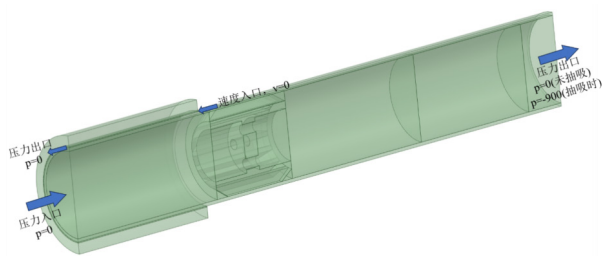


图4 烟具与烟支剖面图

使用用户自定义函数 (UDF) 来实现烟草颗粒的热解过程, 使用用户自定义标量方程 (UDS) 计算烟草颗粒的热分解产物量^[23]。流体的流动采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型。采用 SIMPLE 算法用于压力-速度耦合^[25]。

二、结果与分析

加热卷烟工艺中水分的测量方法有多种, 包括烤箱法、红外法和微波法等。红外法是利用物理中的电磁波, 根据能量各向异性的不同波长, 利用红外光谱检测卷烟工艺中的水分含量。红外法的检测结果与国标烘箱法有很好的一致性, 并且检测效率更高, 但不同的测量方法可能存在系统误差, 导致结果有所差异。

加热卷烟内水分的分布和测量受到多种因素的影响。例如, 加热卷烟的不同部位 (如颗粒段、阻隔段、降温段、过滤段) 中的水分质量是不同的。加热卷烟的加热温度、烟具的结构以及卷烟材料的特性等都会影响水分的释放和残留。因此, 在测量加热卷烟中水分质量分数时, 需要严格控制这些因素, 以确保结果的准确性^[26]。

加热卷烟中烟碱等易挥发物质的质量分数分布也受到多种因素的影响。烟碱的释放和转移受到甘油添加比例、加热温度、卷烟材料等多种因素的影响^[27]。甘油作为一种常用的添加剂, 可以改变加热卷烟中烟碱的分布和释放特性。此外, 加热卷烟材料的特性 (如颜色、成分、晶体结构等) 也会影响烟碱等易挥发物质的分布和测量^[28]。

(一) 不同结构参量下颗粒型加热卷烟流场的模拟结果

1. 抽吸前模拟结果

①第60s时红外透热烟具和加热卷烟内部烟支内温度分布

红外透热烟具内装有颗粒型加热卷烟烟支, 在经过红外透热烟具中轴线处设置一竖直方向截面, 加热至60s时, 四种不同结构参量下该截面烟具和烟支内温度云图及烟支内部轴向温度分布图如图4。

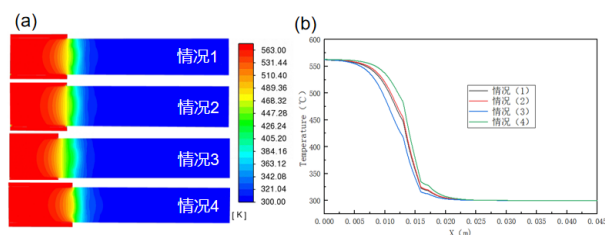


图4 60s时四种不同结构参量下颗粒型加热卷烟的 (a) 温度变化云图;

(b) 烟支内部轴向温度分布

由云图 (4b) 可知: 加热到60s时, 四种不同结构参量下的烟具温度都已达到563K, 且加热卷烟内部烟支温度沿轴向向右递减。从图4中还可以看出: 红外透热烟具内的颗粒段中靠近烟具壁的部分温度高于不靠近的部分, 而在红外透热烟具外的阻隔段中则是卷烟中心温度高于烟具壁处温度, 这是因为热气流主要是从阻隔段固体的中心孔中向右通过。由图5可知, 烟支13mm处至16mm处温度下降速率最快, 是因为此处有阻隔段的存在, 热气流通过阻隔段的中心孔后温度降低速度越来越慢。通过图5, 比较60s时四种情况下加热卷烟内部烟支的内部温度分布情况, 可以发现: 情况 (3) 烟支的温度下降最快, 情况 (1) 比情况 (2) 烟支温度下降得略微快点, 情况 (4) 烟支的温度下降最慢。

②第60s时加热卷烟内部烟支内热解产生水蒸气分布

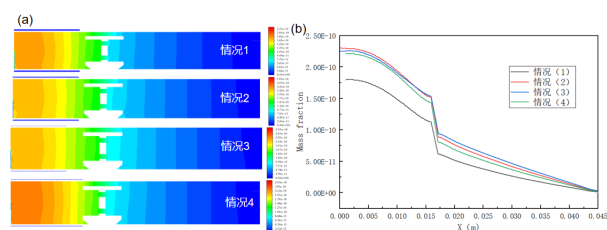


图5 60s时颗粒型加热卷烟烟支内热解产生的 (a) 水蒸气质量分数分布云图; 水蒸气质量分数轴向分布图

图5显示, 加热卷烟内部水蒸气质量分数在靠近红外透热烟具左端中心处最高, 并向吸入口方向递减。图5表明, 在15~17mm (阻隔段) 处水蒸气减少最快, 流经中心孔后减少速度逐渐减缓, 等值线间距增大。研究表明, 热解产物在烟具左端中心浓度最高, 沿轴向递减。60s加热时, 阻隔段显著影响水蒸气分布, 其物理限制和热质交换使水蒸气含量快速下降, 随后减少速度减缓。对比四种情况 (图5), 情况 (2) 左端中心水蒸气最多, 其次是 (3)、(4), (1) 最少。这表明烟具结构、加热方式和流体动力学共同影响热解产物分布, 其中阻隔段作用尤为关键。

③第60s时加热卷烟内部烟支内热解产生的烟碱等易挥发物质分布

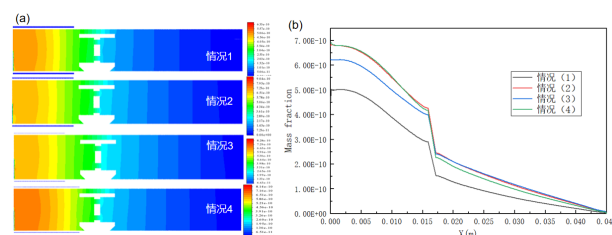


图6 60s时颗粒型加热卷烟烟支内热解产生的易挥发物质的质量分数 (a) 分布云图;

(b) 轴向分布图

研究表明, 加热卷烟内部烟碱及易挥发物质的质量分数呈梯度分布 (图6)。加热源附近 (烟具左端中心) 浓度最高, 因热解作用强烈释放更多挥发物; 沿轴向向吸入口端递减, 反映传输过程中的扩散衰减效应。分布云图显示从高浓度 (加热源) 到低浓度 (吸入口端) 的连续过渡, 印证梯度递减规律。

图6显示60s加热时, 四种情况下的轴向分布差异: 情况 (4) 左端中心挥发物最多, 其次为 (2)、(3), 情况 (1) 最少。该分布模式表明, 挥发物富集于加热源中心区域, 并随距离增加

逐渐减少,形成中心向边缘递减的梯度。

2. 抽吸烟支后模拟结果

① 62s 时红外透热烟具和加热卷烟内部烟支内温度分布

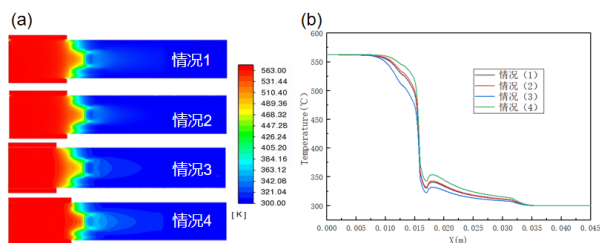


图7 62s时四种不同结构参量下颗粒型加热卷烟的 (a) 温度变化云图; (b) 内部轴向温度分布

图7显示,抽吸62s时四种结构参量的加热卷烟内部温度均呈径向递减。其中13~16mm处(阻隔段区域)温度下降最快,因阻隔结构阻碍热气流;当气流通过中心孔后,温度下降减缓。抽吸作用使热气流右移,导致阻隔段后半段温度轻微回升。分析表明,阻隔段通过减缓气流实现快速降温,穿越中心孔后因流动阻力减小,降温速率降低。抽吸力改变气流分布,引发温度再分配。图7对比显示:情况(3)降温最快,情况(4)最慢,情况(1)略快于情况(2)。该结果验证了结构参量对温度分布的关键影响,阻隔段设计与抽吸效应的交互作用决定了热传递特性。

② 62s 时加热卷烟内部烟支内热解产物分布

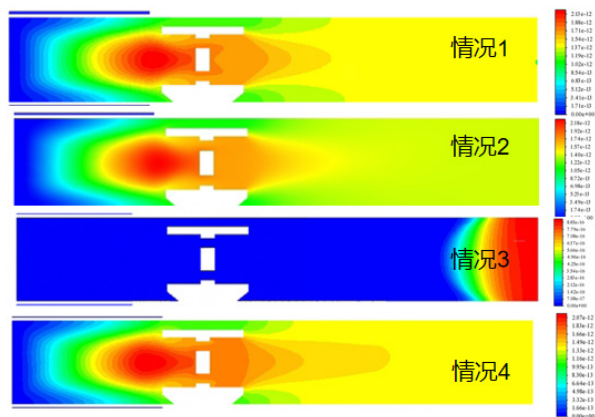


图8 62s时颗粒型加热卷烟烟支内热解产生的水蒸气质量分数分布云图

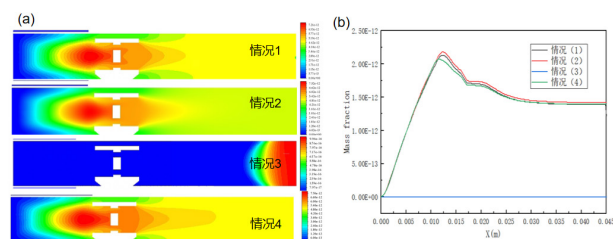


图9 62s时颗粒型加热卷烟烟支内热解产生的 (a) 易挥发物质的质量分数分布云图; (b) 水蒸气质量分数轴向分布图

本研究分析了加热卷烟抽吸过程中的物质迁移规律。结果显示,热气流携带水蒸气和易挥发物质向右移动时,部分成分通过过滤段被吸入,部分因流体动力学效应回流至颗粒段与阻隔段之间(图9~10)。四种测试条件下,情况(2)水蒸气含量最高(图14),其次是(1)、(4)和(3),这种差异源于加热功率、颗

粒孔隙结构及阻隔/降温段设计参数的不同组合。整个抽吸过程伴随着阻隔段和降温段的温度升高,涉及热传导、对流和辐射等多重传热机制。研究表明,抽吸压力、流体涡旋和渗透作用共同调控着物质分流和回流现象,最终影响烟气成分分布和温度变化规律。

(二) 不同结构参量下颗粒型加热卷烟内温度随时间变化情况

本研究系统分析了红外透热烟具颗粒型加热卷烟中颗粒段与阻隔段交界面中心点(0, 0.013, 0)在四种条件下的温度、水蒸气及易挥发物质变化规律(图15~17)。主要发现如下:

1. 温度变化特征(图10):

预热阶段(0~60s),温度持续上升,情况(4)升温最快(544.39K),其次为情况(2)531.42K、(1)527.16K、(3)508.37K。抽吸阶段(60~62s)温度急剧升至峰值,热对流起主导作用。不同升温速率源于红外透热烟具壁厚、间距等结构参数差异。

2. 水蒸气动态变化(图11):

抽吸开始时(60s),情况(3)和(2)水蒸气质量分数达峰值 1.7×10^{-10} ,由蒸发速率和Fick扩散共同作用。抽吸过程(60~62s)因气流携带导致浓度骤降,随后出现回流现象,情况(4)回升最快,反映其颗粒材料优异的吸水性和蒸汽渗透性。

3. 易挥发物质演变(图12):

情况(2)在60s时达最高值 4.77×10^{-10} ,与颗粒中物质含量、热解释放特性相关。抽吸过程呈现"释放-迁移-回流"特征,情况(4)回流最显著,表明其结构更利于物质释放与再吸附。

研究表明:红外透热烟具结构参数通过影响传热传质过程,显著改变颗粒型加热卷烟的温度场和热解产物分布。情况(4)在升温性能和水蒸气保持方面表现最优,而情况(2)更利于易挥发物质释放。这些发现为优化红外透热烟具设计提供了重要依据。

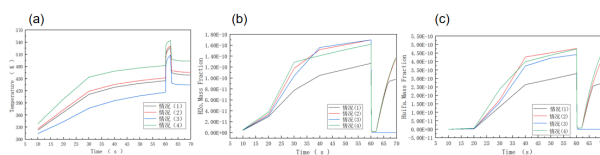


图15 (a) 烟支内部定点温度变化图; (b) 烟支内部定点水蒸气质量分数变化图; (c) 烟支内部定点易挥发物质质量分数变化图

三、结论

本研究系统分析了红外透热烟具与加热卷烟组合产品的传热传质特性,揭示了关键参数的影响机制:

(1) 温度调控机制:增加烟具长度或减小内壁间距会显著改变传热效率。烟具长度延长增加了热传导距离,而间距减小增强了热交换强度,共同减缓温度下降速率。这一过程涉及热导率、对流系数和辐射效率等关键参数的综合作用。

(2) 水蒸气分布特征:较小的内壁间距或较短的烟具长度促使热气流集中流向烟具左端中心区域,导致该区域水蒸气分布增

加（60s时）。这一现象可用对流扩散方程描述，是流速场、温度场和水蒸气浓度场相互作用的结果。

（3）易挥发物质迁移规律：更长的烟具或更小的间距延长了气流路径、减缓了流速，为易挥发物质提供了更多积累时间，使其在烟具左端中心形成较高浓度分布（60s时）。该过程遵循质量守恒定律和菲克扩散定律。

（4）抽吸动态效应：60–62s抽吸期间，热气流快速右移形

成强烈对流，导致定点温度先升至峰值后下降。烟具长度增加或间距减小会加剧气流集中与滞留，提高温度最大值，这一现象涉及动量守恒、能量守恒和伯努利原理。

（5）组分时序变化：定点处水蒸气和易挥发物质质量分数在60s达到峰值，抽吸时因气流移动迅速降低，结束后因压力变化和温度梯度出现回流上升。该过程可通过质量传输方程和涡旋动力学解释，CFD模拟可精确揭示参数与分布的定量关系。

参考文献

[1] 霍现宽, 刘珊, 崔凯, 等. 加热状态下烟草烟气香味成分释放特征 [J]. 烟草科技, 2017, 50(8): 9.

[2] Xiao D, Bai C X, Chen Z M, et al. Implementation of the World Health Organization Framework Convention on Tobacco Control in China: An arduous and long-term task [J]. Cancer, 2015, 121(S17): 3061–3068.

[3] Başaran R, Gü ven N M, Eke B C. An overview of iQOS® as a new heat-not-burn tobacco product and its potential effects on human health and the environment [J]. Turkish Journal of Pharmaceutical Sciences, 2019, 16(3): 371.

[4] Yang G, Wang Y, Wu Y, et al. The road to effective tobacco control in China [J]. The Lancet, 2015, 385(9972): 1019–1028.

[5] 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.

[6] 庞婧. 新型烟草制品监管的研究 [J]. 中外企业文化, 2022(06): 73–75.

[7] 王伟, 马明. 新型烟草制品监管对策研究 [J]. 现代商贸工业, 2022, 43(01): 97–99.

[8] 陈超英. 变革与挑战: 新型烟草制品发展展望 [J]. 中国烟草学报, 2017, 23(3): 14–18.

[9] 裴玉青, 沈轶, 杨举田, 等. 新型烟草制品发展现状及展望 [J]. 中国烟草科学, 2016, 37(5): 92–97.

[10] 赵玉宇, 崔成哲, 朱良华, 等. 加热不燃烧烟草制品的减害性能分析 [J]. 科技创新用, 2020(22): 66–67.

[11] 刘亚丽, 王金棒, 郑新章, 等. 加热不燃烧烟草制品发展现状及展望 [J]. 中国烟草学报, 2018, 24(04): 91–106.

[12] 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.

[13] 康迪, 赵晖, 刘远上, 等. 新型烟草制品发展现状及展望 [J]. 科技与创新, 2020(6): 87–89.

[14] 金鑫. 新型烟草制品发展状态及预测 [J]. 中国市场, 2019(12): 59–60.

[15] 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), 2021, 47(01): 35–40.

[16] 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(09): 85–93.

[17] 王乐, 冯露露, 张柯等. 加热卷烟逐口抽吸过程传热数值模型 [J]. 烟草科技, 2022, 55(06): 80–88.

[18] 盛华权. 低温卷烟加热器强化传热研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.

[19] 黄鸿. 低温卷烟加热过程的温度特性研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.

[20] 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.

[21] 曹芸, 张劲, 王鹏, 等. 烟草颗粒热解与释烟特性影响因素研究 [J]. 中国烟草学报, 2021, 27(1): 9.

[22] 唐培培, 曾世通, 刘珊, 等. 甘油对烟叶热性能及加热状态下烟气释放的影响 [J]. 烟草科技, 2015, 48(3): 61–65.

[23] 杨继, 杨帅, 段沅杏, 等. 加热不燃烧卷烟烟草材料的热分析研究 [J]. 中国烟草学报, 2015, 21(6): 7–13.

[24] Freeman E S, Carroll B. The application of thermoanalytical techniques to reaction kinetics: the thermogravimetric evaluation of the kinetics of the decomposition of calcium oxalate monohydrate [J]. Journal of Physical Chemistry, 1958, 62(4): 394–397.

[25] 颜聪, 谢卫, 李跃峰, 等. 卷烟阴燃过程的数值模拟 [J]. 烟草科技, 2014(6): 15–20.

[26] 朱俊召, 刘金鑫, 聂广军, 等. 加热卷烟含水率测定方法比选及结果修正 [J]. 烟草科技, 2024, 57(1): 22–30.

[27] 吴键, 陈震, 黄峰, 等. 加热卷烟叶丝等温热失重及关键成分释放特性分析 [J]. 轻工学报, 2023, 38(3): 87–93, 111.

[28] 郑燕婷, 马婉婉, 陈欢, 等. 加热卷烟气溶胶特征性成分及其分析方法研究进展 [J]. 烟草科技, 2024, 57(2): 103–112.