

降温段通风孔对加热卷烟降温效果影响的模拟研究

孙金震^{1*}, 方 远¹, 刘 成², 赵文涛², 徐洪涛¹, 贾世豪¹

¹上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

²上海新型烟草制品研究院有限公司, 上海

收稿日期: 2025年8月13日; 录用日期: 2025年10月31日; 发布日期: 2025年11月12日

摘 要

为探究固定通风面积下降温段通风孔设计对加热卷烟烟气流动特性和降温效果的影响, 基于FLUENT建立加热卷烟多孔介质非平衡传热模型, 对烟气流动换热特性展开了数值模拟, 并通过实验测定关键部位温度进行了验证。结果表明: (1) 孔分布对静态加热温度场无明显影响, 降温效果主要由下游端滤棒主导; (2) 通风面积一定时, 加热卷烟出口烟气温度随着孔径增加而降低, 随着通风孔与滤嘴段距离的增加而降低。 (3) D分布下卷烟出口温度最低, 中空段湍流强度、换热系数最大, 分别为23.03%、63.14 (W/m²·K)。数值模拟能较好地反馈烟支温度场和流场, 或可为烟支辅助设计提供一定参考。

关键词

加热卷烟, 通风孔, 多孔介质, 降温, 数值模拟

Simulation of the Influence of Vents Design in the Cooling Section on the Cooling Effect of Heated Tobacco Product

Jinzhen Sun^{1*}, Yuan Fang¹, Cheng Liu², Wentao Zhao², Hongtao Xu¹, Shihao Jia¹

¹School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Shanghai New Tobacco Products Research Institute Co., Ltd., Shanghai

Received: August 13, 2025; accepted: October 31, 2025; published: November 12, 2025

Abstract

To investigate the effects of ventilation hole design in the cooling segment on the aerosol flow char-

*通讯作者。

文章引用: 孙金震, 方远, 刘成, 赵文涛, 徐洪涛, 贾世豪. 降温段通风孔对加热卷烟降温效果影响的模拟研究[J]. 物理化学进展, 2025, 14(4): 605-615. DOI: 10.12677/japc.2025.144058

acteristics and cooling performance of heated tobacco products under a fixed total ventilation area, a numerical model based on FLUENT was developed to simulate non-equilibrium heat transfer in the porous media of the product. Numerical simulations were performed to analyze the flow and heat transfer properties of the aerosol, and the results were validated through experimental measurements of temperatures at key locations. The findings revealed that: (1) The distribution pattern of ventilation holes had no significant influence on the static heating temperature field, with the cooling effect primarily dominated by the downstream filter section; (2) Under a constant ventilation area, the outlet aerosol temperature of the heated tobacco product decreased with increasing ventilation hole diameter and with greater distance between the ventilation holes and the filter segment; (3) The “Distribution D” configuration resulted in the lowest outlet temperature, while exhibiting the highest turbulence intensity and heat transfer coefficient in the hollow segment, reaching 23.03% and 63.14 W/m²·K, respectively. The numerical simulations accurately captured the temperature and flow fields within the cigarette, providing valuable references for auxiliary design of tobacco products.

Keywords

Heated Tobacco Product, Vent, Porous Medium, Cooling, Numerical Simulation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

加热卷烟[1] (Heated Tobacco Product, HTP)是一种通过加热不燃烧的方式生成气溶胶供给消费者吸食的新型烟草制品,因其具有无明火且兼具类似传统卷烟的抽吸体验,近几年来得到了快速的发展[2]-[4]。然而,HTP 在产品开发中仍面临一些挑战,如关键物质释放量少[5] [6]、入口温度高等[7]-[9]。为了降低入口温度,在 HTP 中采用类似传统卷烟的全过滤型滤嘴,虽然能有效降低入口烟气温度,但同时也会增加气溶胶的截留而进一步削减烟气释放量,进而影响消费者的体验[10]。

为解决相关问题,诸多学者展开了 HTP 烟气流动换热和降温特性等相关方面的研究。如罗玮[11]等设计了一种 HTP “降温低截留”滤棒,研究了载体和材料对滤棒降温性能的影响,与 IQOS 烟支样品对比结果表明采用该滤棒的 HTP 烟支入口烟气温度可降低 10℃ 以上。王东岳[12]等对复合降温材料(高强度聚乳酸和熔融共混的无机纳米粒子氮化硼(BN)/聚乳酸(PLA)复合物通过溶剂流延法制备)降温性能进行了研究,结果表明复合材料降温性能比现有降温材料可提升 1%~30%,此外,刘久逸等[13]对三种典型的 HTP 滤嘴结构(折流、空腔、缩放型)在深度抽吸条件下的降温特性进行了考察。除了通过改进降温材料以及滤嘴结构外,设置通风孔也是降低烟气温度和调控气溶胶释放量的重要手段。如孟瑶等[10]制备了带不同通风孔数滤嘴的加热卷烟烟支,相关研究结果表明出口烟气温度随着通风孔数量的增加而降低。尤晓娟[14]等制备了不同通风率降温段的加热卷烟,考察了不同通风率下气溶胶温度变化和组分转移规律。上述相关研究多集中在通风孔数量对烟气温度的影响,而在固定总通风面积下孔的设计对烟气流动换热及降温特性的研究鲜有报道,针对这一现状,本文,聚焦于研究固定通风面积下孔的位置及孔径对通风降温型 HTP 烟支烟气降温效果的影响,通过流动传热数值模拟结合实验研究,分析不同孔设计方式下烟气流动和换热特性,为 HTP 烟支的设计开发及优化提供理论依据和实践参考。

2. 实验与方法

2.1. 实验装置

图 1 为实验装置示意图, 由加热器具、吸烟机、热电偶、PC 及采集器等组成。所用热电偶为 J 型, 测量精度为 0.1°C , 配合对应软件可实现采集频率达 1000 次/s, 可实时测量监控温度并经采集器采集记录后传输至 PC 端软件显示存储。图 2 为烟支物性综合测试系统, 可利用该系统自动快速测得烟支尺寸、重量、吸阻等参数, 主要用于筛选合格实验样品。

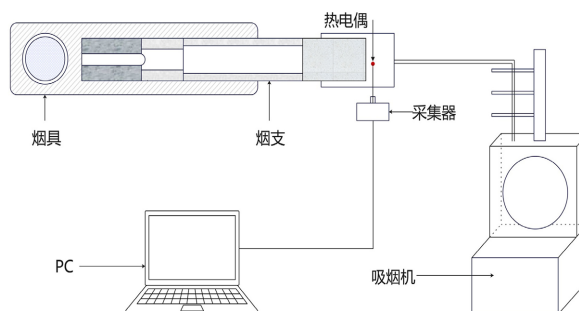


Figure 1. Schematic of the HTP stick
图 1. 实验装置



Figure 2. Cigarette physical property comprehensive testing system
图 2. 烟支物性综合测试系统

2.2. 烟草段源项测定

同批样品以四支加热卷烟为一组, 测定对应口序中预热、抽吸后烟草段关键组分(烟碱、甘油、水)量时, 并取对应平均值作为一支烟支各组分的重量。以烟草段的阶段组分剩余量差值为该阶段对应的组分释放量(暂不考虑化学反应导致的组分消耗与生成), 如测得未加热的烟支组分的含量作为初始含量, 记为 $M_{\text{初始}}$, 第一口预热结束后, 测量烟草段组分剩余量记作 $M_{\text{预热后1}}$, 则 $M_{\text{初始}} - M_{\text{预热后1}}$ 为第一口预热阶段的释放量, 再取一组样品测得第一口抽吸完成后烟草段的组分剩余量(每口抽吸前先进行预热)记作 $M_{\text{抽吸后1}}$, $M_{\text{预热后1}} - M_{\text{抽吸后1}}$ 为第一口抽吸时的释放量, 依此类推, 逐口计算预热和抽吸阶段各关键组分的释放量, 第 n 口预热、抽吸释放量公式为:

$$\begin{aligned} \text{第}n\text{口预热释放量} &= M_{\text{抽吸后}(n-1)} - M_{\text{预热后}n} \\ \text{第}n\text{口抽吸释放量} &= M_{\text{预热后}n} - M_{\text{抽吸后}n} \end{aligned} \quad (1)$$

参考文献[15]-[17]中的方法测量烟草段中各关键组分含量。通过(2)将逐口关键组分以常数项质量源项、能量源项的形式添加到烟草段模型中[18]。

$$S_i = \frac{m_i}{vt}$$
$$S_h = -\Delta h_i S_i^{l \rightarrow v}$$

(2)

其中， i 表示组分种类； m_i 表示质量，kg； v 表示烟草段体积， m^3 ； t 表示时间，s； S_h 表示能量源项； S_i 表示质量源项； Δh_i 表示组分的汽化焓值； l 表示液相； v 表示气相。

3. 计算模型

3.1. 几何模型

加热卷烟结构如图 3 所示，由烟草段、支撑段、降温段(支撑段和降温段在下文简称为中空段)、滤嘴段构成，采用中心加热的方式。在降温段以 5 个 0.3 mm 的通风孔总面积为基准，采用单排周向均匀分布，如表 1 所列，将孔分布方式分为五种。即总的通风面积固定，孔的位置变化或者孔径、孔数同步变化(孔径大则数量少，孔径小则数量多)。

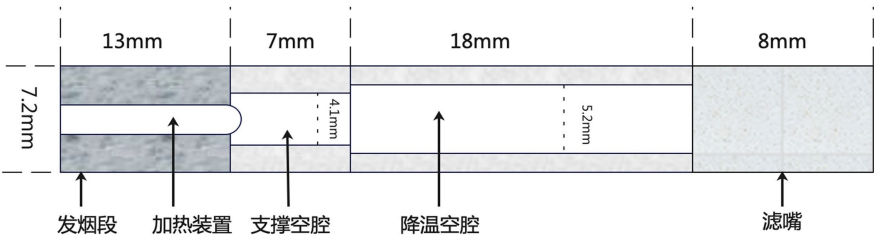


Figure 3. Schematic of the HTP stick
图 3. HTP 烟支结构示意图

Table 1. Types of ventilation holes in the cooling section
表 1. 降温段通风孔类型

类型	孔轴线到滤嘴距离(mm)	孔数(个)	孔直径(mm)
A	17	2	0.47
B	17	10	0.21
C	17	5	0.3
D	24	5	0.3
E	10	5	0.3

3.2. 简化假设

为了建立便于求解的加热卷烟的流动传热模型，对于烟支进行了以下假设：
1、烟气与多孔介质温度较低，不考虑热辐射影响。2、模型中的多孔介质区域各向同性，孔隙率不发生改变且孔径均匀。3、忽略热解反应及截留。

3.3. 控制方程

质量守恒方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} + S_{mass} = 0 \quad (3)$$

式中: ρ 为流体密度, t 为时间, u 、 v 、 w 分别为流体在 x 、 y 、 z 方向上的速度, S_{mass} 为由于分解组分释放(或截留)而产生的质量源项。

动量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{u}) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{momentum} \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{u}) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{momentum} \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \vec{u}) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + S_{momentum} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: p 为压强; τ_{xx} 、 τ_{yx} 、 τ_{zx} 为流体粘性阻力在对应方向上的分量, $S_{momentum}$ 为动量源项, 是多孔介质

τ_{xy} 、 τ_{yy} 、 τ_{zy}

中由于固体的存在而对流体的阻力作用。

$$S_{momentum} = -\left(\frac{\mu}{\alpha} u + \frac{1}{2} C \rho |u| u\right) \quad (5)$$

式中: μ 为动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$, $\frac{1}{\alpha}$ 为黏性阻力系数, C 为惯性阻力系数。

能量守恒方程:

在周期性 2 s 的钟形抽吸条件下, 抽吸作用时间短, 且气、固两相无法达到热平衡状态, 因此假设相间局部热不平衡, 数学模型的控制方程组如下:

流体能量方程:

$$\varepsilon c_{\rho_f} \frac{\partial(\rho_f T_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \vec{v}_f h_f) = \nabla \cdot (k_{f,eff} \nabla T_f) + h_{sf} A_{fs} (T_s - T_f) + S_s \quad (6)$$

固体能量方程:

$$(1 - \varepsilon) \rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla \cdot (k_{s,eff} \nabla T_s) - h_{sf} A_{fs} (T_s - T_f) + S_f \quad (7)$$

其中, ε 为多孔介质孔隙率; ρ_s 、 ρ_f 分别是固体与流体的密度, $k_{f,eff}$ 、 $k_{s,eff}$ 为流体和固体的导热系数, $W/(m \cdot K)$; h_{sf} 、 A_{fs} [18] 为多孔介质间流固换热系数(W/m^2)、多孔介质比表面积($1/m$); S_s 、 S_f 为能量源项。

组分输运方程:

$$\frac{\partial(\rho Y)_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = \frac{\partial \vec{J}_i}{\partial x_i} \quad (8)$$

其中, J_i 为扩散通量; Y_i 为组分 i 在混合气体中质量分数。

3.4. 设置及求解

烟气由关键组分以及空气构成, 烟丝、醋酸纤维、空气、关键组分的物性参数主要来源于参考文献 [19] [20]、物性手册 [21] 和实验测试获得, 各部分的材料参数分别参照烟丝等物理性质进行设置(密度、比热容、空隙率等), 其中烟丝密度通过 UDF 编写, 比热容、导热系数通过 piecewise-polynomial 设置。对

于电加热卷烟混合烟气组分的物理性质进行设置，其中空气的密度、比热容、导热系数通过 piecewise-linear 设置。部分物性参数如表 2。

Table 2. Partial physical properties
表 2. 部分物性参数

参数	取值	参数	取值
醋酸纤维密度 kg/m^3	1280	烟碱密度 kg/m^3	3.8
醋酸纤维比热容 $\text{J/kg}\cdot\text{K}$	1550	烟碱比热容 $\text{J/kg}\cdot\text{K}$	1720
醋酸纤维导热系数 $\text{W/m}\cdot\text{K}$	0.26	烟碱热导率 $\text{W/m}\cdot\text{K}$	0.032
烟草段孔隙率	0.399	甘油密度 kg/m^3	6.87
支撑段孔隙率	0.686	甘油比热容 $\text{J/kg}\cdot\text{K}$	1812.5
降温段孔隙率	0.580	甘油热导率 $\text{W/m}\cdot\text{K}$	0.025
滤嘴段孔隙率	0.903	降温、滤嘴段外表面对流换热系数	20
环境温度 $^{\circ}\text{C}$	26	$\text{W/m}^2\cdot\text{K}$	

(1) 初始条件

初始时刻，烟支各段内部流速均为 0，在入口处指定零梯度条件，初始温度设为 26.85°C ，初始压力为 101325 Pa ，初始时刻流体域中空气的质量分数为 1。

(2) 边界条件

在滤嘴段出口处给定 HCI 模式(加拿大深度抽吸，抽吸容量 55 mL ，加热后第 15 s 开始第一口抽吸，之后每 30 s 抽吸下一口，共八口，总时长 227 s)，根据抽吸流量设置滤嘴出口端 $v = -1.061\sin(\pi t/2)\text{ m/s}$ 的速度入口边界，进气处 $p = 0$ 压力入口边界，壁面采用第三类边界条件，给定边界上物体与周围环境流体间的换热系数及周围流体的温度。

(3) 求解方法

使用 Fluent 求解器对模型进行求解，其中加热元件表面温度、烟草材料热物性、能量源项、质量源项、抽吸模式、烟草段和中空段的比表面积和气固界面对流换热系数均使用(User Define Function, UDF)进行定义。SIMPLE 算法用于压力 - 速度耦合，计算时间步长取 0.1 s ，能量残差收敛性判据设定为 10^{-6} ，其余设为 10^{-3} ，并对网格及时间步长进行了无关性验证。

4. 结果与分析

4.1. 模型验证

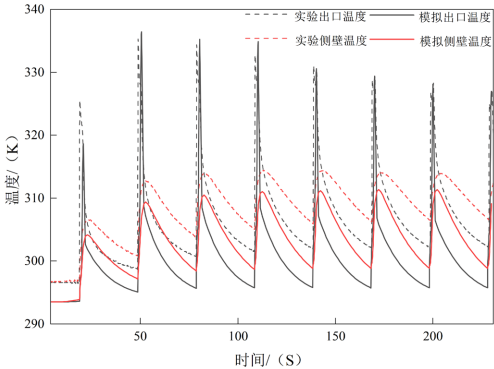


Figure 4. Simulated and experimental temperatures under distribution C
图 4. C 分布下模拟与实验温度

通过加热卷烟定位测温平台实测烟支出口、侧壁(距滤嘴出口 3 mm)温度对模拟结果进行验证,从图 4 中可以清楚地看出模拟温度与实验温度变化趋势一致,最高温度的差值在 5℃ 以内,整体表现出较好的符合水平,但对比结果还是存在些许差异,可能存在以下原因:(1) 逐口抽吸结束时测温平台中烟气抽吸管道内热量未能立即散热,滤嘴出口不能到达室温,因此与模拟存在温差。(2) 模拟未考虑烟支与外界辐射换热的影响等。

4.2. 孔分布对流场的影响

在加热卷烟抽吸过程中,烟气与经通风孔进入烟支内的冷空气交汇会形成复杂的流场,通过图 5 可以看出在抽吸过程中中空段以及通风孔附近的流速较大,速度沿烟支径向逐渐减小,在轴向上孔之前较为平稳,在通风孔区域速度变化剧烈,不同孔分布对烟支轴向速度分布产生不同的影响,从而影响烟气的流动,其中在 A 分布下,从通风孔进入的冷空气会在中心轴线处汇聚,对通风孔前烟气来流产生冲击,改变了烟气流动状态,不规则湍流的成分增多,而在 B 分布下,冷空气质量分配均匀,对进入降温空腔中的来流烟气影响小,烟气始终保持孔前流动。

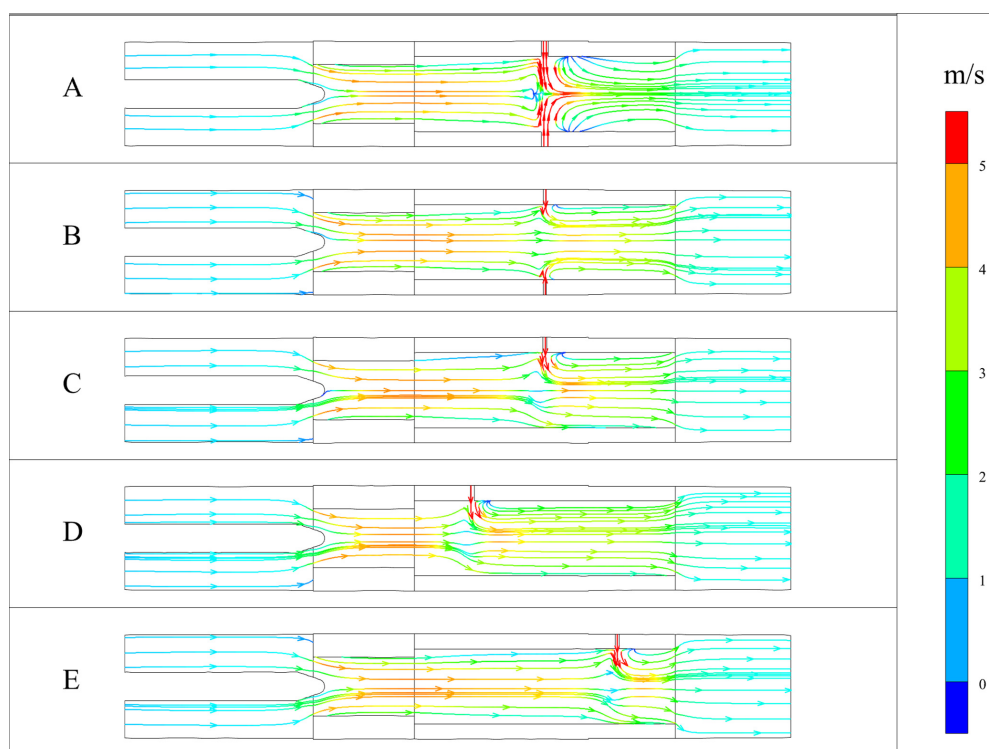


Figure 5. Axial flow diagram of cigarette during puffing ($t = 46$ s)

图 5. 抽吸($t = 46$ s)时烟支轴向流线图

4.3. 孔分布对温度场的影响

为研究孔分布对烟支烟气温度的影响,对预热、抽吸阶段的温度云图进行分析,图 6 所示,为逐口预热结束时烟支的轴向剖面温度分布,在加热过程中烟草段内表面靠近加热装置的区域先开始升温,随着口序的增加,高温区逐步向烟支径向向外围传递,烟草段径向中心温度始终高于外围温度,这符合中心加热卷烟的工作特征,模型能较好的反映在工作范围内预热结束时的烟支温度场的动态分布特征。由于加热温度、烟草段添加质量源、能量源一致,孔位相对于烟草段距离较远,且相关材料的热导率较低,

通风孔分布差异对预热阶段的烟支温度分布无明显影响，预热结束后不同孔分布方式对应的烟丝段体积平均温度相差较小，说明在预热阶段烟丝段受热量基本无差异，即进入烟支后端的热量基本相等，下游温度差异主要有后端降温效果主导。

因抽吸模式为钟形抽吸，对应抽吸过程中中间时刻的抽吸流量最大，各段的换热特征与流动最为显著，且各例烟支烟气逐口温度变化具有相似性。以八口抽吸中第二口(46 s)进行分析。图 7 展示了烟支通风孔轴线处径向剖面以及轴向剖面的温度分布，可以看出抽吸过程中从通风孔进入降温空腔内的气体温度明显低于来流烟气温度，冷气流混合于高温烟气后形成了较明显的降温效果，通风孔前后的烟气温度分布存在明显差异，这是由于处于室温的冷空气所携带的冷量焓在与降温空腔内高温烟气混合时将直接导致烟气降温，从径向温度分布云图还可看出气流经通风孔进入空腔后会形成一定的冲击，不同孔分布对应的冲击强度不同，其中 A 分布下的冲击强度显著，B 分布的冲击强度最弱，其他分布的冲击强度在两者之间。

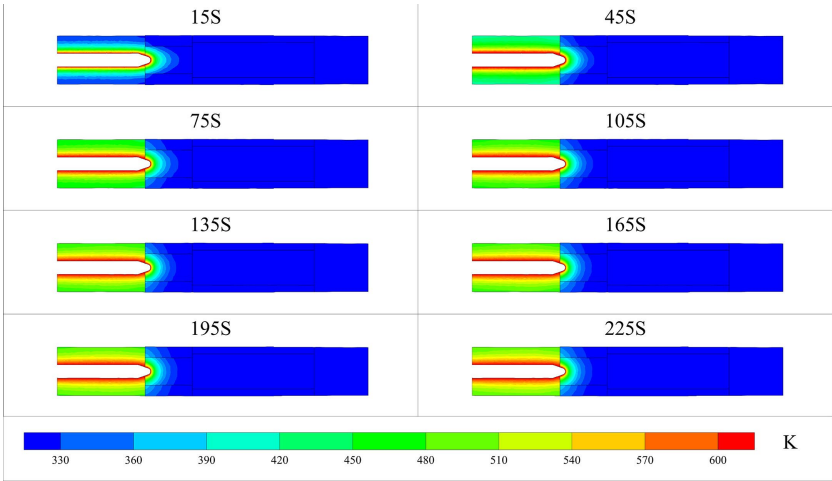


Figure 6. Axial profile temperature of cigarette
图 6. 烟支轴向剖面温度

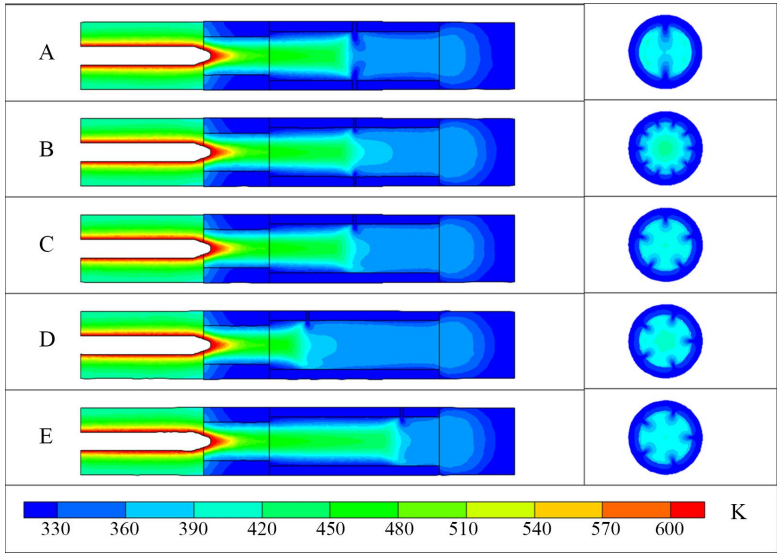


Figure 7. Temperature field distribution during puffing (t = 46 s)
图 7. 抽吸(t = 46 s 时刻)温度场分布

4.4. 孔分布对流动换热特性的影响

进一步分析通风孔的分布对烟气温度和流动换热特性的具体影响，如图 8 所示，随抽吸口序增加，其各例出口烟气逐口最高温度均呈现先升高后降低，在整个过程中，最高出口烟气温度出现在第二口，这一现象与文献[14]中的实验变化趋势一致。这是由于烟草的热解温度范围广、整体热解行为大致相似，在低温阶段(100℃~130℃)主要是以水分蒸发为主，当随着温度的升高(150℃左右)开始释放易挥发的小分子(如烟碱、碳水化合物等) [21]-[23]。首次预热结束，烟草段大部分区域温度低于水分蒸发温度，而在第二口预热结束时烟草段整体已经处于水分蒸发的活跃阶段，此时水分达到释放峰值，尽管后续的预热，烟草段整体温度持续升高且处于水分蒸发范围，但由于每次抽吸使得剩余水分含量逐渐减小，从而导致水分的释放量逐渐减小，而水不仅有明显较高的比热容，蒸发出来的水蒸气还会在接下来的抽吸过程中被冷凝，从而释放出大量相变热量，因此第二口的烟气出口温度最高，后续抽吸的出口烟气温度则逐渐降低，这表明了水分蒸馏挥发是初期烟气温度升高的主要原因，控制烟草材料水分含量也是解决入口温度高的重要手段。

进一步将 A、B、C 分布下出口烟气温度进行对比，可知出口烟气温度随着孔径的增加逐渐减小，B 分布下最高温度为 343.2 K，A 分布下烟气温度相较于 B 分布降低了 6.5 K，将 C、D、E 分布下出口烟气温度进行对比，D 分布下出口烟气温度最低，为 339.2 K，由此可知出口烟气温度随着通风孔距离滤嘴端越远温度越低。通过表 3 可知不同通风孔分布下的进气量大致相同，这表明了通风孔进气量在此情况下对换热性能的影响较小，而前文分析可知不同通风孔分布方式会对空腔产生冲击，形成局部湍流，主要由于通风孔的对称分布所造成，湍流强度不同对应的换热系数不同，通过对比可见，A 分布的湍流强度最大，为 23.03%，依次是 D、C、E、B，其中 B 分布的湍流强度最小，为 17.99%，湍流有助于破坏壁面附近的边界层，从而增加烟气与壁面的热交换，湍流强度的增加会显著提升换热系数，这一结论在表中的中空段平均换热系数数据中得到验证。

Table 3. Heat transfer characteristic parameters
表 3. 换热特性参数

孔分布	孔进气流量(m³/s)	中空段湍流强度(%)	中空段醋纤内壁面平均换热系数 (W/m²·K)	滤嘴内体积平均换热系数 (W/m²·K)
A	1.0445e ⁻⁵	23.03	63.14	1.865
B	1.0175e ⁻⁵	17.99	61.58	1.904
C	1.069e ⁻⁵	21.21	62.56	1.899
D	1.0207e ⁻⁵	22.8	62.68	1.886
E	1.02e ⁻⁵	18.01	62.46	2.009

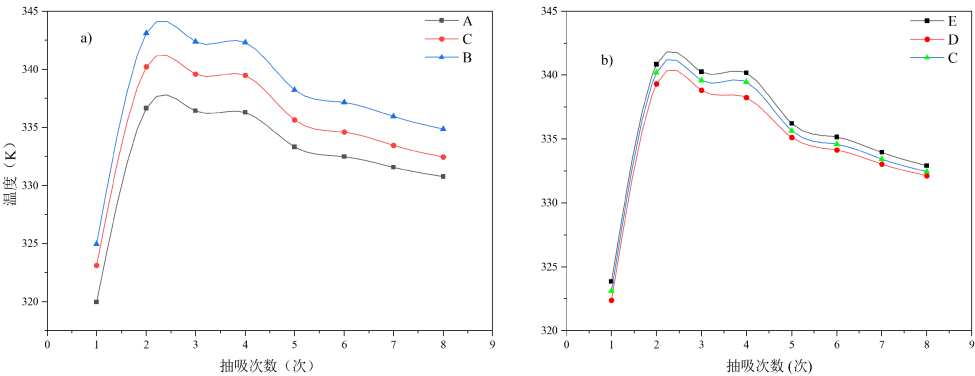


Figure 8. Maximum temperature of exit gas for different vent distributions, port-by-port
图 8. 不同通风孔分布出口烟气逐口最高温度

对比 A、B、C 以及 C、D、E 分布下的滤嘴内换热系数, 可知当中空段的换热系数大时, 滤嘴内的换热系数相对略低, 这可能是烟气在经过中空段后温度已经得到了相对有效地降低, 进入滤嘴的总热量较低, 对醋酸纤维的降温要求不再高, 且滤嘴内的换热系数集中在 $1.865\sim 2.009\text{ (W/m}^2\cdot\text{K)}$, 相对于中空段较小。因此, 出口烟气温度的差异主要受中空段的影响, 综上分析可见通风孔分布方式不同时, 烟气流动换热特性受到空腔内壁换热系数、湍流强度等因素的共同影响。

5. 结论

本文基于数值模拟和实验研究探索了总通风面积固定时的通风孔的设计对通风降温型 HTP 烟支烟气流动传热特性和降温效果的影响, 从研究内容和相关结果的分析讨论可得出以下主要结论:

(1) 建立了不同通风孔设计下 HTP 烟支气固两相局部非热平衡的流动传热模型, 采用源项的形式描述烟草段的组分释放, 逐口最高温度的模拟与实验结果相差在 5°C 内, 表明了模型对烟支烟气流动换热以及降温效应有一定预测性;

(2) 通风孔设计对 HTP 烟支静态加热时的温度分布无明显影响, 但能明显影响抽吸过程中的温度场和流场分布, 不同通风孔设计对应的冲击强度不同;

(3) 在通风面积一定时, 出口烟气温度随着与滤嘴段距离增加而降低, 随着孔径的增大而降低, 孔径大相较于孔径小出口烟气温度降低 6.5 K ;

(4) 通风孔进气量接近时, 通风孔分布主要从湍流强度、中空段内壁换热系数等方面综合影响烟气流动换热和降温效果。

参考文献

- [1] 罗萌柔, 李世卫, 赵杨, 等. 点燃和加热条件下不同滤嘴通风率卷烟的气溶胶释放特征[J]. 烟草科技, 2023, 56(2): 53-61.
- [2] 史健阳, 郭林青, 梁坤, 等. 环境相对湿度对干法再造烟叶加热卷烟关键指标的影响[J]. 烟草科技, 2022, 55(2): 84-90.
- [3] 刘钻福, 窦玉青, 张本强, 等. 烘烤工艺对加热卷烟烤烟原料香气成分及感官质量的影响[J]. 中国烟草科学, 2022, 43(3): 57-63.
- [4] 陈芝飞, 蔡莉莉, 郑峰洋, 等. 加热卷烟中 6 种酮类单体香料的转移行为[J]. 中国烟草学报, 2022, 28(4): 1-7.
- [5] 葛畅, 赵明月, 胡有持, 等. 细支与常规卷烟主流烟气常规指标及中性致香成分对比分析[J]. 烟草科技, 2017, 50(4): 43-50.
- [6] 李翔宇, 许蔼飞, 姜兴益, 等. 原位萃取法测定加热卷烟气溶胶中的水分和焦油[J]. 烟草科技, 2022, 55(2): 70-76.
- [7] Forster, M., Liu, C., Duke, M.G., McAdam, K.G. and Proctor, C.J. (2015) An Experimental Method to Study Emissions from Heated Tobacco between $100\text{--}200^\circ\text{C}$. *Chemistry Central Journal*, 9, Article No. 20. <https://doi.org/10.1186/s13065-015-0096-1>
- [8] Farsalinos, K.E., Yannovits, N., Sarri, T., Voudris, V. and Poulas, K. (2017) Nicotine Delivery to the Aerosol of a Heat-Not-Burn Tobacco Product: Comparison with a Tobacco Cigarette and E-Cigarettes. *Nicotine & Tobacco Research*, 20, 1004-1009. <https://doi.org/10.1093/ntr/ntx138>
- [9] 张博, 杜文, 王志国, 等. 滤嘴通风率对加热卷烟气溶胶主要成分释放量的影响[J]. 烟草科技, 2023, 56(8): 54-62.
- [10] 崔华鹏, 孟璠, 陈黎, 等. 滤嘴通风对加热卷烟气溶胶物理特性及其温度的影响[J]. 轻工学报, 2023, 38(3): 81-86.
- [11] 罗玮, 谢兰英, 秦亮生, 等. 加热卷烟“降温低截留”滤棒的制备及应用[J]. 烟草科技, 2021, 54(3): 50-57.
- [12] 王东岳, 雷萍, 杨仁裕, 等. 加热非燃烧卷烟降温材料用聚乳酸及其复合物的性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(4): 21-28.
- [13] 刘久逸, 杜磊, 王孝峰, 等. 基于 CFD 的加热不燃烧卷烟滤嘴降温特性研究[J]. 广东化工, 2021, 48(2): 53-56.
- [14] 尤晓娟, 王明辉, 刘献军, 等. 降温段通风对加热卷烟气溶胶释放行为的影响[J]. 烟草科技, 2023, 56(11): 70-78.
- [15] (2018) ISO 16632 No. 57. Determination of Water in Tobacco and Tobacco Products by Gas Chromatographic Analysis.

CORESTA.

- [16] (2019) Recommended Methods No. 60. Determination of 1, 2-Propylene Glycol and Glycerol in Tobacco and Tobacco Products by Gas Chromatography.
https://www.coresta.org/sites/default/files/technical_documents/main/CRM_60-June2019.pdf
- [17] (2021) Recommended Methods No.62. Determination of Nicotine in Tobacco and Tobacco Products by Gas Chromatographic Analysis.
<https://www.coresta.org/determination-nicotine-tobacco-and-tobacco-products-gas-chromatographic-analysis-29185.html>
- [18] Nordlund, M. and Kuczaj, A.K. (2016) Modeling Flow, Heat and Mass Transfer in a Porous Biomass Plug When Used in an Electrically Heated Tobacco System. *Sixth International Conference on Porous Media and Their Applications in Science, Engineering and Industry*, Waikoloa, 3-8 July 2016, 120-125.
- [19] 马亚萍, 刘朝贤, 王乐, 等. 不同温度条件下烟丝——发烟剂体系热物性研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(9): 69-73.
- [20] 刘光启, 马连湘, 项曙光. 化学化工物性数据手册——有机卷[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 590-592.
- [21] 马鹏飞, 李巧灵, 林凯, 等. 加热非燃烧烟草薄片的热解特征研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(4): 71-74.
- [22] 艾明欢, 杨菁, 沈轶, 等. TG-FTIR 联用研究 HnB 烟草基质在 400°C 以下的热解特性和气相产物[J]. 中国烟草学报, 2020, 26(1): 8-14.
- [23] 胡永华, 宁敏, 张晓宇, 等. 不同热失重阶段烟草的裂解产物[J]. 烟草科技, 2015, 48(3): 66-73.