

红外透热烟具与颗粒型加热卷烟组合产品的热仿真研究

李延岩¹ 陈健² 董正文² 王孝峰¹ 丁乃红³ 张晓宇¹ 曹芸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

2 南京理工大学安全科学与工程学院

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

DOI:10.12238/pe.v3i4.15101

[摘要] 为了研究经红外发热管辐射热量后烟具内空气和卷烟的热量传递过程以及物质分布特征,建立了红外透热烟具和颗粒型加热卷烟模型,采用Fluent数值模拟软件,模拟烟具空载及卷烟在烟具加热下的温度分布和物质分布。结果表明:①烟具空载时,加热26s后烟具内空气温度达到稳定,中心温度为563K,与烟具壁温相同;②烟具内装入烟支时,传热变慢,颗粒段内靠近烟具壁面处温度较高,中轴处温度低。加热30s后烟支内大部分温度达563K,气流通过阻隔段中心孔后,降温速度和热解产物减少速度逐渐变慢;③抽吸时,分解产物在前0.5s时运动至过滤段,随后有一部分通过过滤段被抽吸者不断吸入。

[关键词] 加热卷烟制品; 数值模拟; 热解; 计算流体力学; Fluent

中图分类号: TS452 **文献标识码:** A

Thermal simulation study of infrared heat-transparent smoking tools and granular heated cigarette combination products

Yanyan Li¹ Jian Chen² Zhengwen Dong² Xiaofeng Wang¹ Naihong Ding³ Xiaoyu Zhang¹
Yun Cao¹ Shun Zhou^{1,3*}

1 Key Laboratory of Combustion & Pyrolytic Study of CNTC, China Tobacco Anhui Industrial Co., Ltd.

2 School of Safety Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology.

3 Anhui Provincial Key Laboratory of Aerosol Analysis, Modulation and Biological Effect, China Tobacco Anhui Industrial Co., Ltd.

[Abstract] In order to study the heat transfer process and material distribution characteristics of the air and cigarette inside the smoking device after the heat is radiated by the infrared heat pipe, a model of infrared heat-transparent smoking device and granular-type heated cigarette was established, and Fluent numerical simulation software was used to simulate the temperature distribution and material distribution of the unloaded smoking device and the cigarette heated by the smoking device. The results show that: (1) When the smoking device is unloaded, the air temperature inside the device reaches a stable temperature after 26s of heating, and the centre temperature is 563K, which is the same as the wall temperature of the device; (2) When the device is loaded with cigarettes, the heat transfer slows down, and the temperature inside the granule section is higher close to the wall of the device, while the temperature at the central axis is lower. After heating for 30s, most of the temperature inside the cigarette reaches 563K, and after the airflow passes through the centre hole of the barrier section, the speed of cooling down and the reduction of pyrolysis products gradually becomes slower; (3) When smoking, the decomposition products move to the filter section in the first 0.5s, and then a part of them are continuously inhaled by the smoker through the filter section.

[Key words] Heated cigarette products; Numerical simulation; Pyrolysis; Computational fluid dynamics; Fluent

烟草作为卷烟制品的原材料,在世界各地已有悠久的历史^[1]。吸食烟草时,烟碱给吸烟者带来生理上的满足,但同时也

会对人体健康造成影响^[2-3]。随着生活水平逐渐提高,人们对吸烟产生的健康危害也更加关注。因此,为了降低传统卷烟对人体造成的危害。新型烟草制品,如加热卷烟制品、电子烟等产品,在行业中已有一定发展。新型烟草制品和传统烟草制品的根本区别在于,新型烟草制品通过加热不燃烧方式就能给吸烟者带来与传统卷烟相似的感受,并且同时其热解所产生的有害物质较传统卷烟明显减少,对健康的危害也相对较小^[4]。目前,新型加热烟草制品在国际市场正持续快速发展,且具有广阔的发展前景^[5-7]。

本文采用Fluent数值模拟,研究经红外发热管辐射热量后颗粒型加热卷烟内部和烟具内部温度场分布以及速度等变化情况,重点分析颗粒型加热卷烟内部气体输运及热量传递过程,判断受热空间内热流场分布均匀性和烟具内加热区温度范围热量规律,为加热卷烟制品的数值模拟研究提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 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。

1.2 方法

1.2.1 烟草颗粒热解反应动力学模型

文献^[8]已通过热重实验测试了烟草颗粒的热解特性,该文章通过热重分析仪,温度从313K升至673K,以20K/min的升温速率进行升温,得到了不同甘油含量、不同水分含量以及不同粒径烟草颗粒的质量分数随温度变化的失重曲线(TG),通过求导作出微分失重曲线(DTG)。本文选取水分含量为10.88%,甘油含量为23.50%,粒径为1.51mm的烟草颗粒为模拟对象,在Fluent中设置烟草颗粒在加热时发生的反应。

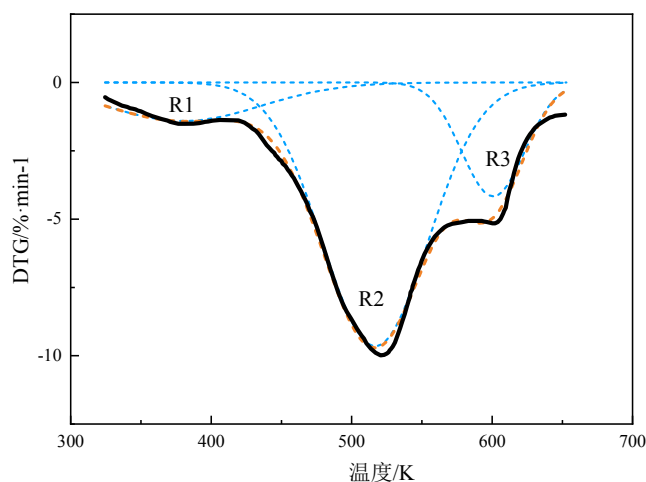


图1 烟草颗粒的TG和DTG曲线

图1为烟草颗粒样品在N₂气氛下的失重曲线TG和微分失重

曲线DTG。分析热重实验所得的烟草颗粒TG及DTG曲线,可以确定烟草颗粒在热解过程中发生的反应。用Origin软件将DTG曲线分峰拟合分成3个独立平行反应,分别由R1、R2和R3共3个峰表示,每个峰看作烟草颗粒中主要成分的热解^[9]。根据学者的研究和总结,其中,R1代表水分的蒸发,R2代表烟碱等易挥发物质的逸出^[10],R3代表纤维素等大分子化合物的裂解产物的释放^[11]。

根据阿伦尼乌斯公式对以上3种分解产物分别写出热解动力学方程:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} = -A_i \cdot \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right) \cdot \left(-\frac{\rho_i}{\rho_0}\right)^{N_i} \cdot \rho_{i0} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \sum_{i=1}^4 \frac{\partial \rho_i}{\partial t} \quad (2)$$

式中: ρ_i —第*i*种热解产物的质量浓度(kg/m³); ρ_{i0} —烟草颗粒中热解产物的初始质量浓度(kg/m³); t —时间(min); R —理想气体常数[8.314 J/(mol·K)]; T —烟草颗粒温度(K); A_i —第*i*种热解前驱体发生热解反应的指前因子(min⁻¹); E_i —第*i*种热解前驱体发生热解反应的活化能(kJ·mol⁻¹); N_i —第*i*种热解前驱体发生热解反应的反应级数。

采用Freeman-Carroll法^[12]研究烟草颗粒的热分解动力学参数,通过对曲线数据计算,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。

用 α 表示转化率,将公式(1)改写为:

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} = -A_i \cdot \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right) \cdot (1-\alpha_i)^{N_i} \quad (3)$$

将公式(3)两边同时取对数,再微分可得:

$$d \ln \left(\frac{d\alpha_i}{dt} \right) = -\frac{E_i}{R} d \ln \left(\frac{1}{T} \right) + N_i d \ln (1-\alpha_i) \quad (4)$$

将公式(4)取以10为底的对数,并作差可得:

$$\frac{\Delta \lg \left(\frac{d\alpha_i}{dt} \right)}{\Delta \lg (1-\alpha_i)} = -\frac{E_i}{2.303 \Delta \lg (1-\alpha_i)} + N_i \quad (5)$$

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 ²	414
R3	1.7	180.6	5.8×10 ¹³	107

作出 $\frac{\Delta \lg \left(\frac{d\alpha_i}{dT} \right)}{\Delta \lg (1-\alpha_i)} \sim \frac{\Delta \left(\frac{1}{T} \right)}{\Delta \lg (1-\alpha_i)}$ 的曲线, 并线性拟合, 可由斜率和

截距求出活化能 E_i 及反应级数 N_i , 将 E_i 与 N_i 回代至公式(3)可求出指前因子 A_i 。所求得各产物的热分解动力学参数如表1所示。

1.2.2 几何模型构建

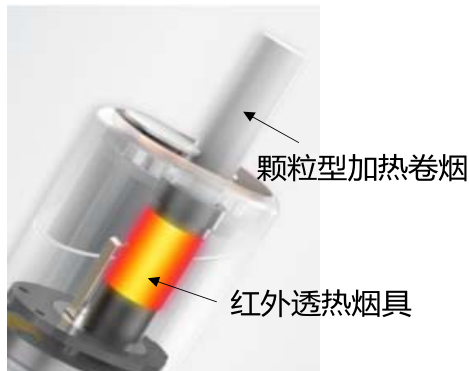


图2 红外透热烟具与颗粒型加热卷烟耦合模型

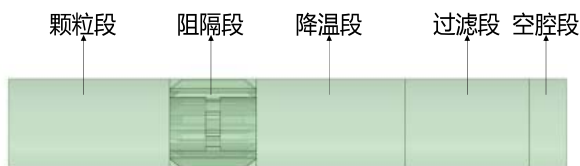


图3 颗粒型加热卷烟结构示意图

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)
烟具长度	12
烟具外径	9.05
烟具内径	7.35
烟具壁厚	0.85
烟具内壁到烟支间距	0.15
纸管壁厚	0.25
烟支长度	45
颗粒段长度	13
阻隔固件长度	7
降温段长度	12
过滤段长度	10

在红外透热烟具内, 放置颗粒型加热卷烟, 卷烟和烟具内留有空隙。红外透热烟具的核心发热管材质为石英玻璃, 通过红外加热来使温度升高。红外透热烟具内的颗粒型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2所示, 颗粒型加热卷烟结构示意图如图3所示。颗粒型加热卷烟由纸管包裹, 烟支内部分为颗粒段、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, 阻隔段内为一固件, 降温段和空腔段内皆为空气, 过滤段内为醋酸纤维材料。烟具与加热卷烟之间的间隙为空气。红外透热烟具及颗粒型加热卷烟的参数如表2所示。

1.2.3 组分输运模型

由于本研究中的烟草颗粒热解会生成水蒸气和烟碱等多种物质, 因此使用Fluent软件中的组分输运模型求解。组分输运模型的控制方程为^[13-14]:

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (6)$$

$$\vec{J}_i = -\rho D_{i,m} \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T} \quad (7)$$

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。

1.2.4 数值模拟

在建模软件中建立红外透热烟具和颗粒型加热卷烟的三维模型, 并划分网格, 网格总数为1, 318, 810。将模型导入Fluent中, 并设置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。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:

$$\alpha = \frac{D^2}{150} \frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)^2} \quad (8)$$

$$C_2 = \frac{3.5}{D} \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \quad (9)$$

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列出了各流体域的物性参数。

红外透热烟具的壁温通过Fluent中的expression设置为从0至25s内温度由300K线性升高至563K。卷烟和烟具的初始温度皆为300K。如图4所示, 在烟具与烟支之间空隙两侧分别设为速度入口和压力出口, 烟支两侧分别设压力入口和压力出口。烟支入口温度设置与烟具一致。抽吸时过滤段的出口压力为-900Pa, 未抽吸时为0Pa。

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	9.1×10^3
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	1.9×10^6	8.5×10^7

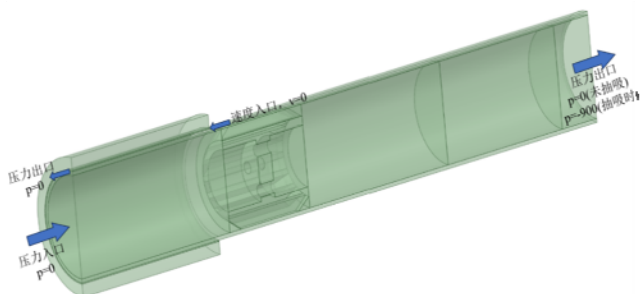


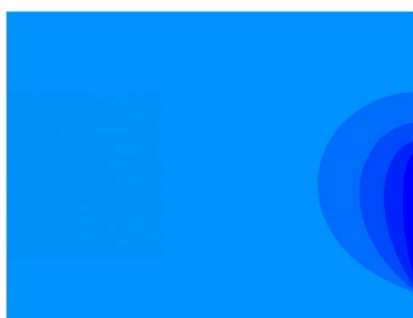
图4 烟具与烟支剖面图

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^[15-16]。流体的流动采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型。采用SIMPLE算法用于压力-速度耦合。收敛残差设定为 10^{-3} 。迭代时间步长为0.01s。

2 结果与讨论

2.1 烟具空载情况下模拟结果

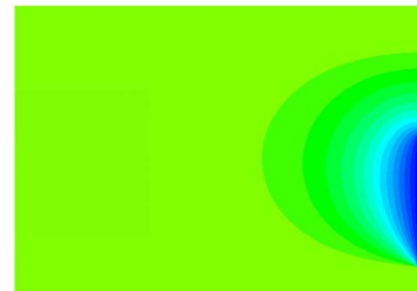
红外透热烟具内未插入颗粒型加热卷烟即空载状态,烟具内全为空气。在经过加热烟具中轴线处设置一竖直方向截面,该截面下,加热烟具内空气温度变化云图如图5所示。



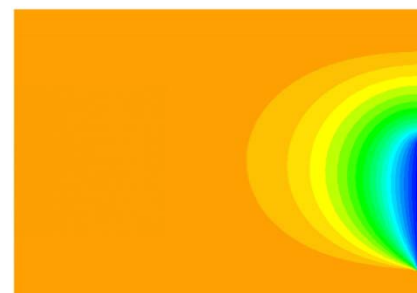
t=5s



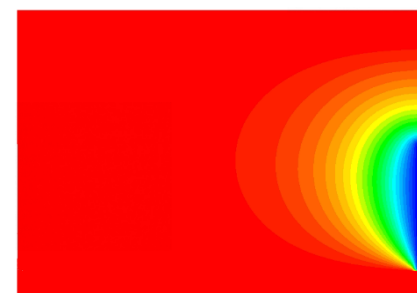
t=10s



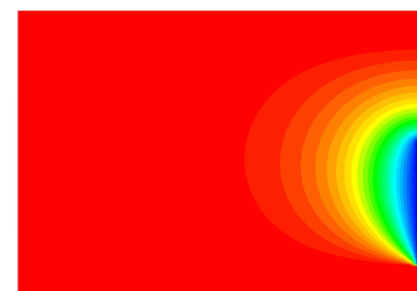
t=15s



t=20s



t=25s



t=26s

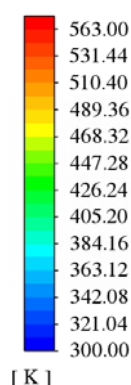
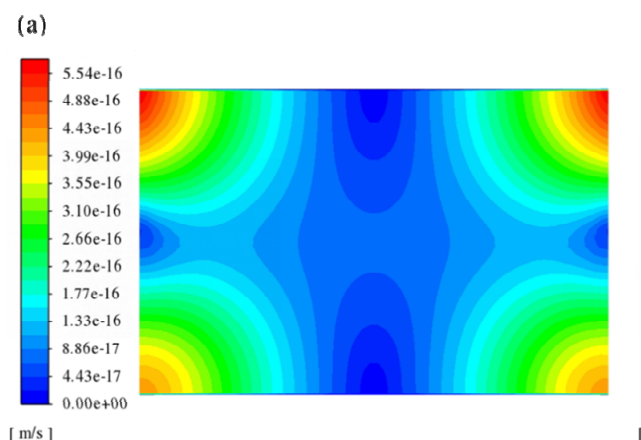


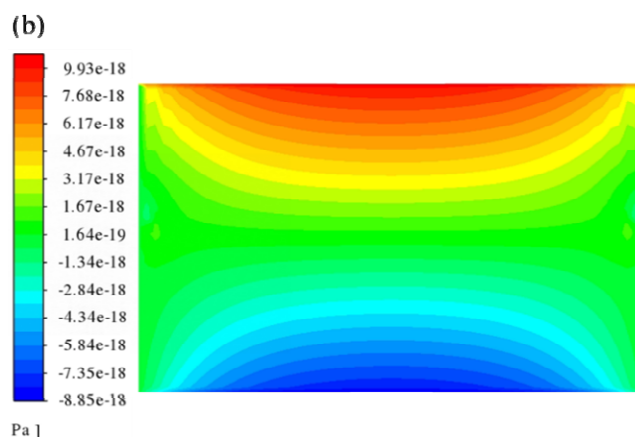
图5 空载时烟具内温度变化图

由以上温度变化云图可见,开始加热后随着红外透热烟具的温度上升,烟具内空气温度也随之升高。其中右侧下方的出口处空气温度为300K,烟具内其余部分空气温度始终保持和烟具壁温相同。烟具内空气的温度等值线呈“C”型分布。25s时烟具温度升至563K后保持不变,随后烟具内空气温度升高缓慢,26s时烟具内温度达到稳定,并保持不变。加热过程中,烟具内空气左侧和靠近壁面处首先开始升温。由于空气右侧出口温度为室温,因此升温过程中整个烟具内空气温度分布呈现右端低,中间和左侧高的情况。且由于重力作用,热空气分布在上方,因此空气温度分布上下不对称,低温出现在右下方。温度基本保持不变后,烟具内大部分温度可达到接近烟具温度的563K,烟具加热效果显著。

图6为稳定后红外透热烟具内空气流速与压强分布云图。6s时空气流速和压强分布均已保持稳定不变,且与开始加热时相差不大,均接近于0。由图可见,空气的流速和压强分布均左右对称,由于重力作用,速度相对较高区域集中在入口与出口处的上方及下方,且上方速度相对更大。同时空气上侧压力为正,下侧压力为负。



(a) 流速分布云图



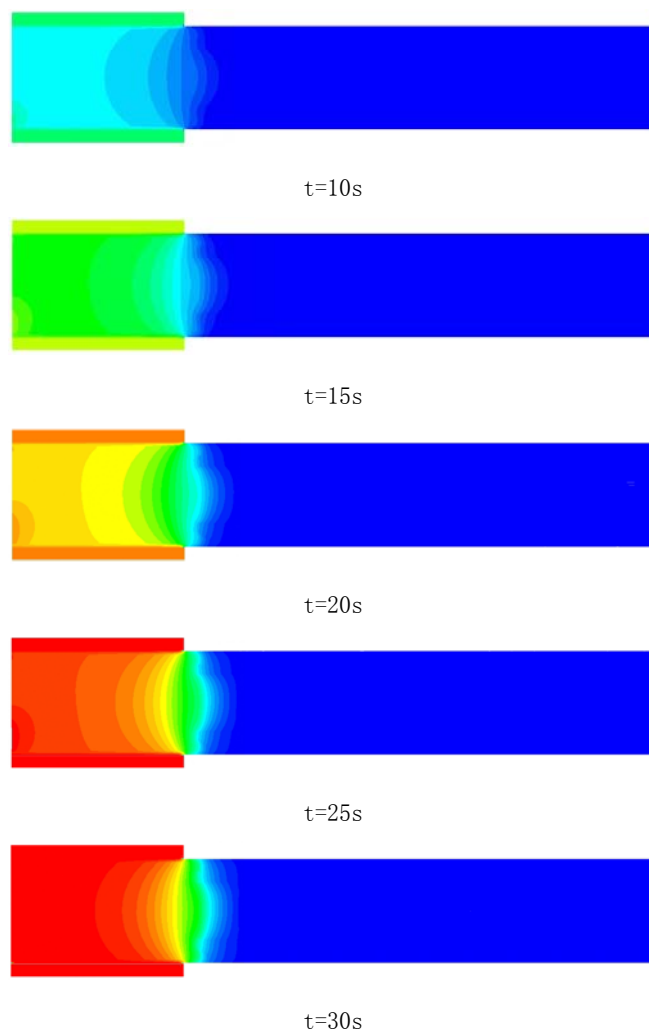
(b) 压强分布云图

图6 空载下稳定时烟具内空气流速与压强分布云图

2. 烟具内放有烟支情况下模拟结果

2. 2. 1 未抽吸烟支时情况

红外透热烟具内装有烟支,在经过烟具中轴线处设置一竖直方向截面,开始加热后60s内,该截面下烟具和烟支内温度变化云图如图7所示。



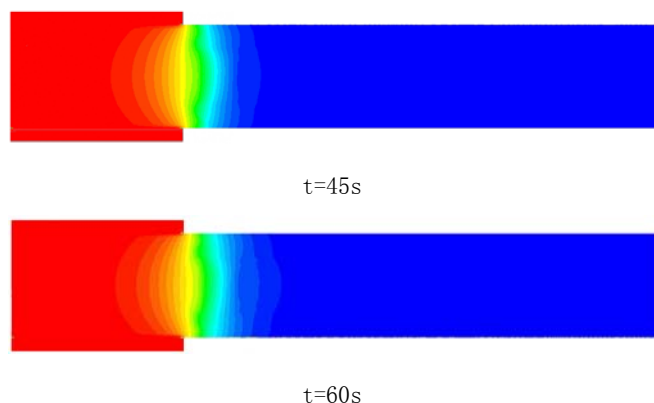


图7 烟具内装有烟支时卷烟温度变化云图

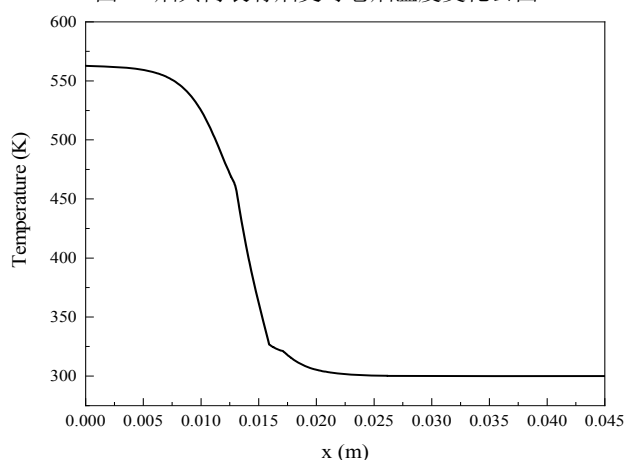


图8 60s时烟支内部轴向温度分布

由图7可知,开始加热后,由于烟纸和烟草颗粒的导热系数低于空气,因此升温速率低于空载时。烟具内的颗粒段中靠近烟具壁的部分温度更高,而在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固件中心的孔中向右通过。烟具温度升高至25s后,烟具温度保持为563K不变,此后烟支内气体温度还在升高。随着烟具持续加热,30s至60s时,颗粒段温度变化很小,热量沿径向向右传递,阻隔段的温度在缓慢升高。图8为60s时烟支内部轴向温度分布图,由图可知,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。

图9为烟支内热解产生的水蒸气及烟碱等易挥发物质的质量分数分布云图,图9为加热60s时烟支内水蒸气质量分数轴向分布图。由图可知靠近烟具左端中心的分解产物分布最多,越靠近吸入口端分布越少。在10mm左右处水蒸气减少最快,流体通过阻隔段的中心孔后水蒸气越来越少,且等值线距离增大,说明减少速度逐渐变缓。

2.2.2 抽吸烟支时情况

加热60s后开始以-900Pa的压力抽吸2s,抽吸过程中烟具和烟支内温度变化云图如图11所示,水蒸气及烟碱等易挥发物质的质量分数分布云图如图12所示。

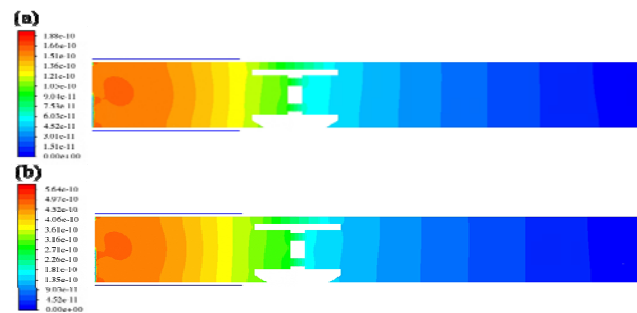


图9 60s时烟支内(a)水蒸气质量分数云图(b)易挥发物质质量分数云图

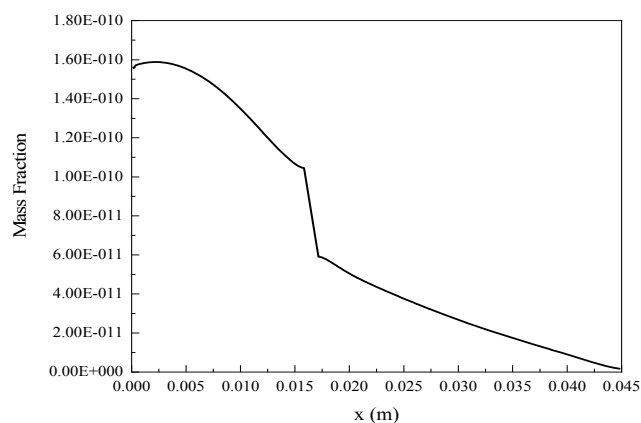


图10 60s时烟支内水蒸气质量分数轴向分布图

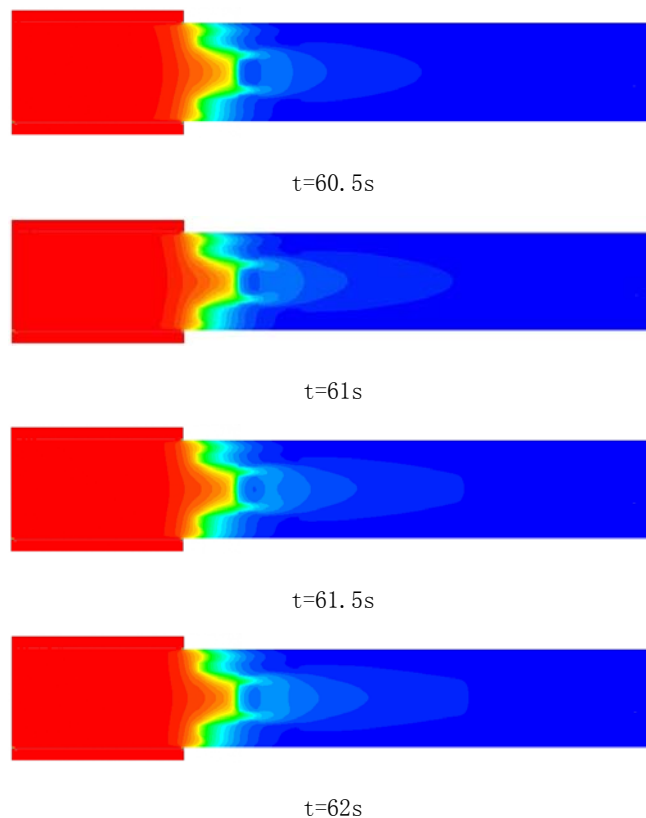


图11 抽吸过程中卷烟温度变化云图

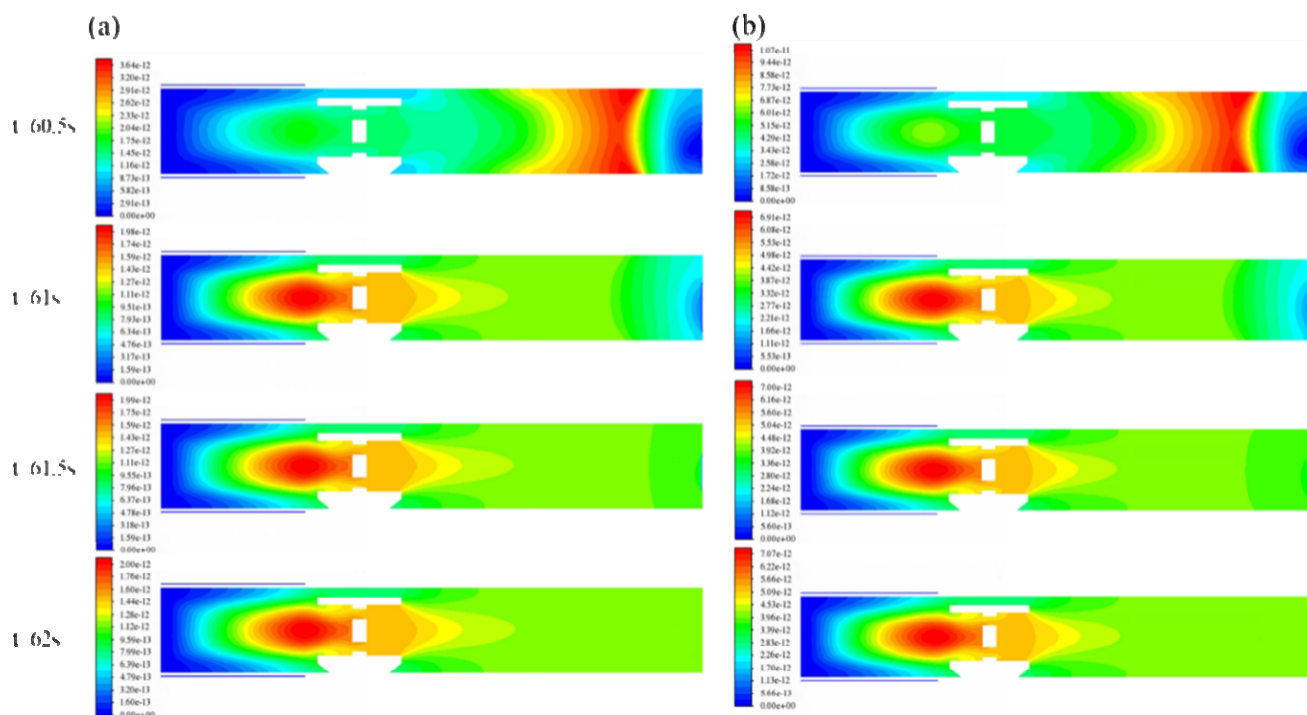


图 12 抽吸过程中烟支内(a)水蒸气质量分数云图(b)易挥发物质质量分数云图

抽吸过程中, 热气流迅速被抽向右侧移动, 抽吸0.5s, 即60.5s时水蒸气及烟碱等热解产物集中于过滤段中。由61s的产物分布云图可知, 由于过滤段的过滤作用, 水蒸气及烟碱有一部分通过过滤段, 被抽吸者吸入, 而另一部分则回流至烟支左侧。随着继续抽吸, 水蒸气及烟碱等热解产物不断向右流动, 通过烟支右侧出口被抽吸者吸入, 此时烟支内的阻隔段和降温段的温度也在逐渐升高。

3 结论

(1) 红外透热烟具空载时, 26s后空气温度达到稳定, 烟具内大部分温度可达563K。

(2) 烟具内装入烟支时, 传热明显变慢。30s后烟支内温度上升较慢, 此后烟支内大部分温度达563K。颗粒段内靠近壁面处温度较高, 中轴处温度低。阻隔段处温度下降速率最快, 通过阻隔段中心孔后, 热气流降温速度逐渐变慢, 热解产物减少速度也逐渐变缓。

(3) 抽吸时, 水和烟碱等分解产物在前0.5s时大部分分布在过滤段, 随后一部分通过过滤段, 不断被抽吸者吸入, 另一部分回流。

[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)。

[参考文献]

[1]何权瀛.烟草历史之一瞥[J].中华结核和呼吸杂志,2013,

36(1):32.

[2]宋慧芳,孙德俊.烟草危害的现状[J].国际呼吸杂志,2017,37(8):630-632.

[3]萧鲲,许浦生,林虹.加热型烟草制品流行情况及其危害的研究进展[J].中华结核和呼吸杂志,2024,47(1):64-69.

[4]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.

[5]张兴伟,邢丽敏,齐义良,等.新型烟草制品未来发展探讨[J].中国烟草科学,2015(4):110-116.

[6]叶为全.新型烟草制品发展及对策分析研究[J].经济界,2023,(04):49-54.

[7]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(03):14-18.

[8]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.

[9]Cardoso C R,Miranda M R,Santos K G,et al.Determination of kinetic parameters and analytic pyrolysis of tobacco waste and sorghum bagasse[J].Journal of Analytical & Applied Pyrolysis,2011,92(2):392-400.

[10]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.

[11]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.

[12]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.

[13]杜亮.基于CFD的卷烟烟气流动与扩散状态研究[D].广州:华南理工大学,2018.

[14]余其昌,吴君章,黄翼飞,等.基于CFD模拟卷烟烟气扩散过程的影响因素[J].烟草科技,2017,50(5):73-78.

[15]颜聪,谢卫,李跃锋,等.卷烟阴燃过程的数值模拟[J].烟

草科技,2014(6):15-20.

[16]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(1):35-40.

作者简介:

李延岩(1990—),男,汉族,河南沁阳人,研究生,职称:工程师,从事的研究方向:新型烟草产品研发。

*通讯作者:

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。