

文章编号:1674-2974(2016)12-0134-06

普通醋纤香烟滤嘴内温度及烟碱分布模拟^{*}

李珊红^{1,2†}, 王垭曼^{1,2}, 李彩亭^{1,2}, 曾光明^{1,2}, 丁倩倩^{1,2}, 郭威^{1,2}

(1. 湖南大学 环境科学与工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 环境生物与控制教育部重点实验室(湖南大学), 湖南 长沙 410082)

摘要:为减少香烟抽吸过程中烟碱对人体健康的危害,在ISO抽吸模式下,采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型、SIMPLE算法和多孔介质模型对普通醋纤香烟滤嘴内烟气温度与烟碱截留规律进行研究.结果表明,抽吸过程中烟气总焓随时间逐渐降低;烟碱在轴向上迁移速度快,但随着向吸食端扩散,烟碱温度逐渐降低,速度减慢,截留量也不断减少;径向上烟碱在热泳力作用下,布朗无规则运动加剧,烟碱在每一截面上分布较分散,烟碱截留效率降低.普通醋纤香烟滤嘴的烟碱模拟截留效率为30.59%,与相同实验条件下测得的效率接近.研究结果为滤嘴的优化设计提供理论依据.

关键词:醋纤滤嘴;数值模拟;温度分布;烟碱分布;截留效率

中图分类号:X701.3

文献标识码:A

Simulation of Nicotine and Temperature Distribution in Acetate Fiber Cigarette Filter Tip

LI Shan-hong^{1,2†}, WANG Ya-man^{1,2}, LI Cai-ting^{1,2},
ZENG Guang-ming^{1,2}, DING Qian-qian^{1,2}, GUO Wei^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China;

2. Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control (Hunan Univ),
Ministry of Education, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: In order to reduce the harm of the nicotine to human body during the suction, the distribution of nicotine interception and flue gas temperature in the cellulose acetate cigarette filter under ISO suction mode was simulated via the standard $k-\epsilon$ turbulence model, SIMPLE algorithm and porous medium model. The results showed that the total enthalpy of air decreased gradually with the time, and the nicotine spread quickly and decreased gradually along the axial direction, because nicotine temperature gradually decreased and nicotine slowly moved down when spreading to the smoking end. Moreover, the nicotine also distributed discretely, which reduced the nicotine intercept efficiency because of the fierce Brownian motion under thermophoretic force along the radial direction. Meanwhile, it is found that the simulation intercept efficiency of cellulose acetate cigarette filter was 30.59%, which was close to the experimental efficiency under the same conditions, and the results can provide theoretical basis for the optimal design of

* 收稿日期:2015-12-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51108168), National Natural Science Foundation of China(51108168);中国博士后科学基金资助项目(2011M501271);湖南省科技厅项目(2012RS4001);湖南省自然科学基金资助项目(13JJ3044);国家留学基金委资助项目;湖南大学青年教师成长计划资助项目

作者简介:李珊红(1975-),女,湖南汨罗人,湖南大学助理教授,博士

† 通讯联系人, E-mail: lsh-17208@hnu.edu.cn

the filter.

Key words: acetate cigarette filter tip; numerical simulation; temperature distribution; nicotine distribution; intercept efficiency

卷烟在抽吸过程中经高温燃烧、裂解等过程产生的烟气,包括烟碱、一氧化碳、氮氧化物、氨、氢氰酸、酚类等有害成分,其中烟碱占卷烟烟气总生物碱量的 95% 以上^[1-4]. 烟碱对人体中枢神经有强烈刺激和麻痹作用,大量摄入会令人晕眩、呕吐甚至中毒死亡. 抽吸一支烟,人体通常可吸入 0.2~2.5 mg 烟碱^[5],因此去除香烟烟气中的烟碱对人体健康有重要意义. 通常用能过滤吸收烟草烟气中多种有害成分的醋酸纤维制作卷烟滤嘴^[6]. 目前汪秋安等^[7]采用固相微萃取法测定了卷烟主流烟气中的游离烟碱. 曹建华^[5]、王进等^[8]研究了醋酸纤维滤嘴对香烟主流烟气中烟碱的去除效果. 李艳平等^[9]通过实验考察了卷烟滤嘴内烟碱的空间分布及过滤效率. 上述工作大多需进行大量的实验,而实验研究常受到各种条件的限制,计算机模拟可降低人力、物力消耗,并准确、形象地再现滤嘴内的烟碱分布^[10-12]. 本研究在对普通醋纤滤嘴内烟碱分布进行模拟研究的基础上^[10],进一步研究滤嘴内部烟气温度变化及其对截留烟碱量的影响,分析截留烟碱的效果.

1 几何模型及网格划分

建立普通醋纤滤嘴(3.0Y32000)的几何模型,其长为 28 mm,圆周长为 24.5 mm,网格采用六面体划分,并对边界层进行加密. 经网格无关性验证,选用 150×100(滤嘴圆周×轴向)网格进行模拟,其总结点数达到 270 276,网格数达到 260 000. 滤嘴几何模型及网格图如图 1 所示,其中,Z=28 mm 为过滤嘴与烟丝相连的烟丝端,Z=0 为吸食端. 烟气从烟丝端流向吸食端,烟碱在滤嘴内部被截留.

2 数学模型

假定滤嘴为孔隙率一致、孔径均匀的多孔介质,不考虑焦油的沉积及除烟碱外的其他组分的挥发. 模拟采用标准 $k-\epsilon$ 双方程湍流模型,非稳态 3D 分离隐式求解器, SIMPLE 算法,标准壁面函数处理近壁面区域. 烟气与烟碱流动视为定常流,其中烟碱看作连续相,并考虑到烟碱与烟气之间的相互作用,如热

泳扩散,在欧拉模型下进行模拟. 烟碱和烟气作为互相贯穿连续的多相流动,占据的空间以体积分数(α_q)表示,且烟碱和烟气相各自满足质量、动量和能量守恒定律^[13-14]. 烟气的体积分数方程如式(1)所示.

$$\sum_{p=1}^n \alpha_q = 1. \tag{1}$$

式中: α_q 是第 q 相的体积分数. 质量守恒方程如式(2)所示.

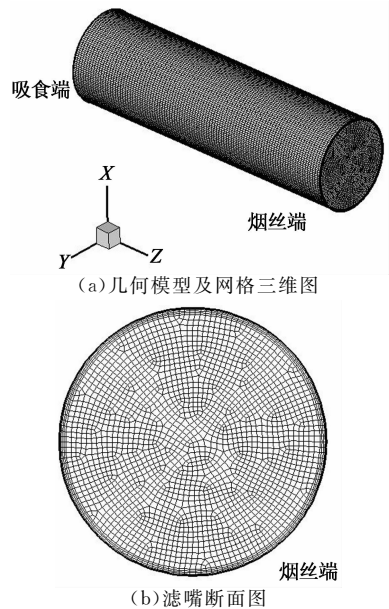


图 1 几何模型及网格图
Fig. 1 Geometric model and grid

$$\frac{\partial(\alpha_q \rho_q)}{\partial t} + \nabla(\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_{mq}. \tag{2}$$

式中: ρ_q 是 q 相的密度, kg/m^3 ; \mathbf{v}_q 是 q 相的速度, m/s ; t 是时间, s ; \dot{m}_{pq} 表示从 p 相到 q 相的传质, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; \dot{m}_{qp} 表示从 q 相到 p 相的传质, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; S_{mq} 是 q 相的质量源相, kg . 动量守恒方程如式(3)所示.

$$\frac{\partial(\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q)}{\partial t} + \nabla(\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q \mathbf{v}_q) = -\alpha_q \nabla P + \nabla \bar{\tau}_q + \sum_{p=1}^n (\mathbf{R}_{pq} + \dot{m}_{pq} \mathbf{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \mathbf{v}_{qp}) + \mathbf{F}_q, \tag{3}$$

$$\bar{\tau}_q = \alpha_q \mu_q [(\nabla \mathbf{v}_q + \nabla \mathbf{v}_q^T)] - \frac{2}{3} \alpha_q \mu_q \nabla \mathbf{v}_q \cdot \mathbf{I}, \tag{4}$$

$$\sum_{p=1}^n \mathbf{R}_{pq} = \sum_{p=1}^n K_{pq} (\mathbf{v}_p - \mathbf{v}_q). \tag{5}$$

式中: P 为压力, Pa; $\overline{\tau}_q$ 是 q 相的应力应变张量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^2)$; \mathbf{R}_{pq} 是相间的相互作用力; \mathbf{F}_q 包括所有的外部力, 其中包含粒子做布朗运动所受到的热泳力; μ_q 是 q 相的黏度 (kg/ms); I 是单位张量; K_{pq} 是相间动量交换比例系数. 能量守恒方程如式(6)所示.

$$\frac{\partial(\alpha_q \rho_q H_q)}{\partial t} + \nabla(\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q H_q) = -\alpha_q \left(\frac{\partial P_q}{\partial t} \right) + \overline{\tau}_q : \nabla \mathbf{v}_q - \nabla \mathbf{q}_q + \sum_{p=1}^n (Q_{pq} + \dot{m}_{pq} H_{pq} - \dot{m}_{qp} H_{qp}). \quad (6)$$

式中: H_q 是 q 相的焓, J/kg ; \mathbf{q}_q 是热通量, W/m^2 ; Q_{pq} 是 p 相与 q 相间的热交换, W/m^2 ; H_{pq} 与 H_{qp} 分别是 p 相与 q 相间的相间焓, J/kg . 相间的能量转移 (Q_{pq}) 假设为温度差的函数:

$$Q_{pq} = h_{pq} (T_p - T_q), \quad (7)$$

$$h_{pq} = \frac{6k_q \alpha_p \alpha_q Nu_p}{d_p}. \quad (8)$$

式中: h_{pq} 是 p 相与 q 相间的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; 传热系数与 p 相 Nusselt 数 Nu_p 有关, k_q 是 q 相的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[15-16].

3 边界条件

实验测试表明, 抽吸香烟时, 通过滤嘴的烟气为一种气溶胶, 含有气、粒两相, 烟碱存在于粒相, 烟气中粒子数约 10^{11} 个/230 mL, 平均粒径 $0.1 \sim 0.4 \mu\text{m}$, 90% 的粒子粒径 $50 \text{ nm} \sim 1.0 \mu\text{m}$, 粒径呈正态分布, 中位粒径 $0.254 \mu\text{m}$. 因粒径较小, 跟随性好, 类似于气体分子运动^[17]. 本研究中滤嘴视为孔隙率为 0.77 的均匀多孔介质^[18]. 滤嘴内部醋酸纤维素纤维传热系数为 $0.050 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[19]. 滤嘴近烟丝端采用速度入口, 速度大小随时间发生变化, 通过自定义函数 UDF (User Defined Function) 加载. 烟气进口温度设定为 373 K ^[20]. 滤嘴近吸食端采用压力出口, 大小为 -1100 Pa , 滤嘴壁厚 0.08 mm .

4 结果与分析

4.1 抽吸完毕轴向上烟碱的温度分布

抽吸完毕 (即 $t=2.0 \text{ s}$ 时), 烟碱沿轴向中心轴线上的温度分布如图 2 所示. 由图可知, 抽吸完毕时, 烟碱温度沿轴向上逐渐下降, 在近烟丝端烟碱的温度最高, 烟碱在滤嘴内部由烟丝端向吸食端扩散, 与醋酸纤维表面接触被吸附截留并与其传热, 温度降低, 在近吸食端温度降至最低, 且接近室温.

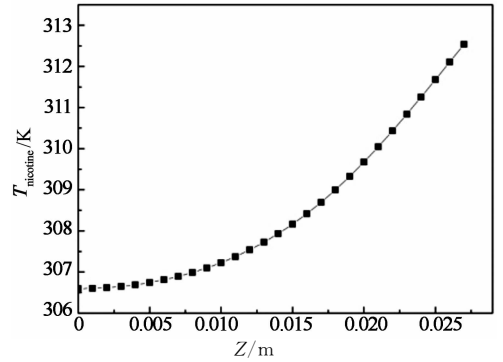


图 2 抽吸完毕 ($t=2.0 \text{ s}$) 轴向上烟碱的温度分布
Fig. 2 Temperature of nicotine along axial direction when suction is completed ($t=2.0 \text{ s}$)

4.2 不同时刻滤嘴轴向上烟气的总焓分布

在 2 s 的抽吸过程中, 观察滤嘴内烟气在不同时刻 ($0.4 \text{ s}, 0.8 \text{ s}, 1.2 \text{ s}, 1.6 \text{ s}, 2.0 \text{ s}$) 的总焓分布情况. 如图 3 所示, 烟气进入滤嘴后, 总焓的分布效果与温度大致相同, 呈现出逐渐降低的趋势. 在前 0.4 s 时, 烟气刚刚进入滤嘴, 传热与扩散效果较弱, 总焓量变化不明显. 0.4 s 后, 烟气逐渐进入滤嘴, 在轴向方向, 烟气由烟丝端向吸食端扩散, 经传热温度不断降低, 总焓量随之下降. 1.6 s 后到抽吸结束, 总焓量较低且变化不大.

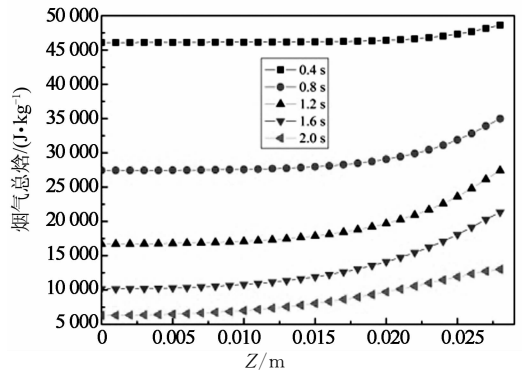


图 3 不同时刻 ($t=0.4 \text{ s}, 0.8 \text{ s}, 1.2 \text{ s}, 1.6 \text{ s}, 2.0 \text{ s}$) 滤嘴轴向上烟气的总焓分布
Fig. 3 The total enthalpy of air in filter tip along axial direction at different time ($t=0.4 \text{ s}, 0.8 \text{ s}, 1.2 \text{ s}, 1.6 \text{ s}, 2.0 \text{ s}$)

4.3 烟碱分布

4.3.1 不同时刻滤嘴 $X=0$ 截面内的烟碱分布

在 2 s 的抽吸时间内, 模拟普通醋纤滤嘴对烟碱的截留, 获取不同时刻 ($t=0.4 \text{ s}, 0.8 \text{ s}, 1.2 \text{ s}, 1.6 \text{ s}$) 滤嘴内的烟碱分布, 如图 4 所示. 由图可知, 0.4 s 内, 烟气刚刚进入滤嘴, 烟碱量较少; 随着烟气持续进入滤嘴向吸食端扩散, 烟碱被截留, 滤嘴内的烟碱量少许增加; 1.2 s 后, 由于烟气入口速度降低, 向吸食端扩散较慢, 烟碱继续被截留, 烟碱量由烟丝端向

吸食端逐渐减少.

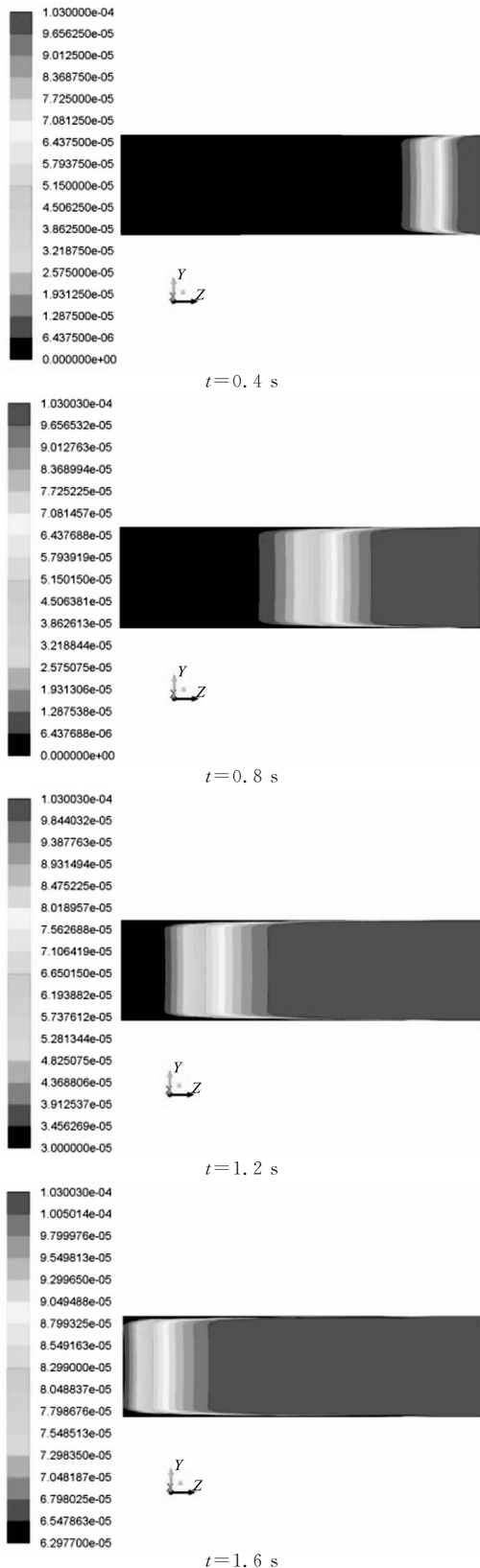


图 4 不同时刻($t=0.4\text{ s}, 0.8\text{ s}, 1.2\text{ s}, 1.6\text{ s}$)滤嘴($X=0$ 截面)的烟碱分布
 Fig. 4 Nicotine contour in filter tip($X=0$) at different time($t=0.4\text{ s}, 0.8\text{ s}, 1.2\text{ s}, 1.6\text{ s}$)

4.3.2 滤嘴烟碱体积分数的三维分布

为直观地显示烟碱在滤嘴中体积分数的分布情况,选取抽吸时间 $t=1.6\text{ s}$ 及 2.0 s 时,观察滤嘴内 3 个不同截面($Z=0.007\text{ m}, 0.014\text{ m}, 0.021\text{ m}$)的烟碱分布情况,如图 5 所示.由图可知,烟碱在 3 个不同截面内的体积分布规律基本相近,在每个截面沿径向方向分布较为均匀.由于中心区域的速度相对较大,从滤嘴中心流过的烟气多于外周,但烟气进入滤嘴时温度较高,烟碱比较活跃,在热泳力作用下,布朗无规则运动加剧,使每一截面上烟碱分布较分散.

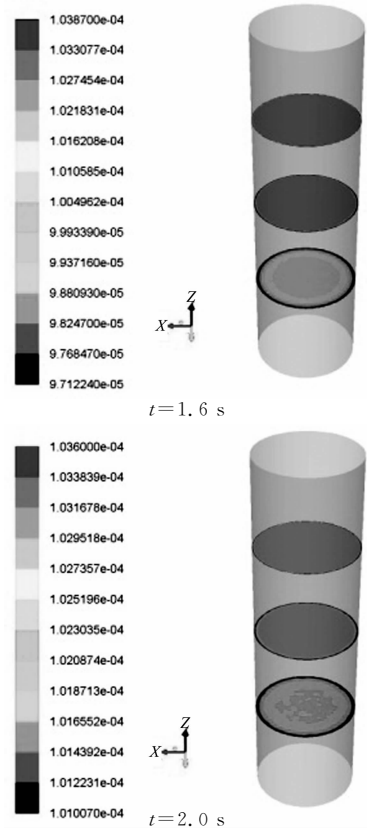


图 5 不同抽吸时间($t=1.6\text{ s}, 2.0\text{ s}$)滤嘴($Z=0.007\text{ m}, 0.014\text{ m}, 0.021\text{ m}$)中的烟碱分布
 Fig. 5 Nicotine distribution in filter tip ($Z=0.007\text{ m}, 0.014\text{ m}, 0.021\text{ m}$) at suction time ($t=1.6\text{ s}, 2.0\text{ s}$)

4.3.3 抽吸完毕轴向上烟碱的体积分数分布

抽吸完毕(即 $t=2.0\text{ s}$ 时),烟碱沿轴向中心轴线上的体积分数分布如图 6 所示.由图可知,由于烟气进入滤嘴时温度较高,烟碱在滤嘴内部比较活跃,迁移速度快,使烟碱的体积分数沿中心轴线首先变化不明显,但随着烟气由烟丝端向吸食端扩散,烟碱温度逐渐降低,速度减慢,烟碱与醋酸纤维表面接触而被吸附截留,使得烟碱沿中心轴线的截留量不断降低,吸食端烟碱量低于烟丝端烟碱量.

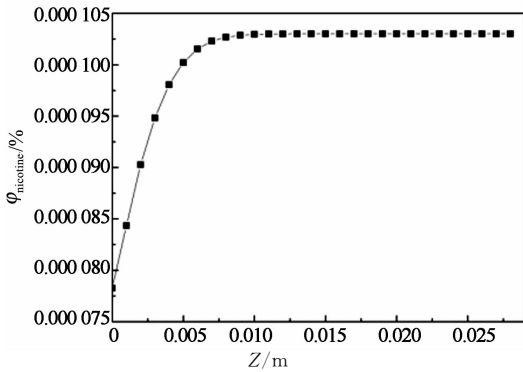


图6 抽吸完毕($t=2.0$ s)轴向上烟碱的体积分数
Fig. 6 Nicotine volume fraction along axial direction when suction is completed ($t=2.0$ s)

4.3.4 抽吸完毕径向上烟碱的体积分数分布

抽吸完毕($t=2.0$ s)时,滤嘴中心面(即 $Z=0.014$ m)径向上烟碱的体积分数分布如图7所示.由图可知,由过滤断面的中心处至壁面处,烟碱的体积分数大致呈下降趋势.中心处通过的烟气量较多,抽吸结束烟碱在此分布也较多.但由于烟碱受到热泳力的作用,在滤嘴内做布朗无规则运动,使得烟碱在滤嘴内随机分布,其体积分数在径向上变化不大,在近壁面处,烟碱的体积分数下降较多,这与图5中的不同抽吸时刻,沿滤嘴长度方向不同截面($Z=0.007$ m, 0.014 m, 0.021 m)的体积分数分布规律基本一致.

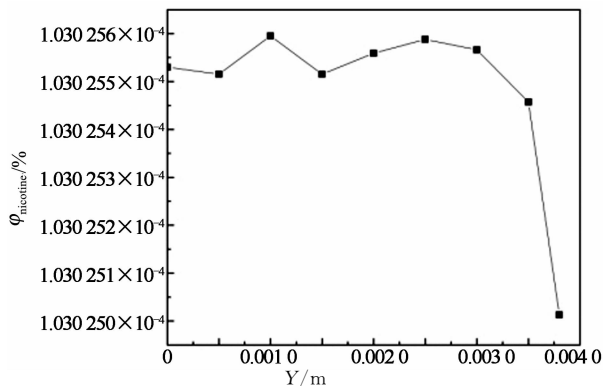


图7 抽吸完毕($t=2.0$ s)径向上烟碱的体积分数
Fig. 7 Nicotine volume fraction along radial direction when suction is completed ($t=2.0$ s)

4.4 烟碱的截留效率

通过监视滤嘴入口及出口断面得到烟碱的平均体积分数,经计算可得模拟滤嘴烟碱的过滤效率达到30.59%.而实验条件与模拟几何模型及边界设置相近时,ISO抽吸模式下普通滤嘴截留烟碱量和主流烟气中烟碱量实验结果分别为0.75 mg/cig和1.17 mg/cig,相对于烟碱总释放量1.92 mg/cig,实验测得的烟碱过滤效率为39.06%.实验与模拟结

果的相对误差为21.6%.产生误差是由于实验中烟气成份较复杂,烟气中焦油可与烟碱粒子黏附形成更大的颗粒,并在滤嘴中不断沉积形成烟尘过滤初层,使滤嘴内部结构更利于截留超细的烟碱粒子^[21],但模拟过程中假定滤嘴孔隙率均匀不变,未考虑经黏附等作用形成的新过滤层;同时烟气进入滤嘴内温度较高,烟碱在滤嘴内部比较活跃,运动剧烈,迁移速度快,实验测得通过滤嘴的烟气90%粒子粒径为50 nm~1.0 μ m,粒径呈正态分布,粒子在热泳力作用下做布朗运动,粒径对它的影响较大,但本研究中只考虑了对中粒径0.254 μ m的烟碱粒子的模拟,因此滤嘴截留烟碱效率的模拟值较低.

5 结论

本文对抽吸过程中滤嘴内烟气的温度及滤嘴截留烟碱的规律进行了研究,并探讨了温度对滤嘴截留烟碱的影响.结果表明,抽吸过程中,烟气总焓随时间逐渐降低;烟碱在轴向上由于入口温度较高而迁移速度快,随着向吸食端扩散,烟碱温度逐渐降低,速度减慢,截留量不断降低;径向上烟碱在热泳力作用下,布朗无规则运动加剧,烟碱在每一截面上分布较分散,在壁面处减少,不利于截留烟碱.模拟的烟碱截留效率为30.59%,采用模拟的方法研究滤嘴内烟碱截留规律对滤嘴的优化设计具有理论指导意义.

参考文献

- [1] BAKER R R, BISHOP L J. The pyrolysis of tobacco ingredients [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2004, 71(1): 223-311.
- [2] BABER R R. Smoke generation inside a burning cigarette: modifying combustion to develop cigarettes that may be less hazardous to health [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2006, 32(4): 373-385.
- [3] 韩敏, 戴云辉, 虞苏行, 等. 醋纤和改性丙纤滤嘴过滤卷烟烟气有害成分效果比较[J]. *烟草科技*, 2010(3): 8-10.
HAN Min, DAI Yun-hui, TUO Su-xing, *et al.* Comparison of filtration effects of cellulose acetate and modified polypropylene filters for harmful components in cigarette smoke[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2010(3): 8-10. (In Chinese)
- [4] 李超, 张健, 姜黎, 等. 卷烟主流烟气中6种化学成分的逐口释放量分析[J]. *烟草科技*, 2015, 48(3): 39-46.
LI Chao, ZHANG Jian, JIANG Li, *et al.* Analysis of puff-by-puff release of six chemical components in mainstream cigarette smoke[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2015, 48(3): 39-46. (In Chinese)

- [5] 曹建华. 改性醋酸纤维束及其在烟气过滤中的应用研究[D]. 上海:东华大学纺织学院, 2006: 26-28.
CAO Jian-hua. Preparation of modified cellulose acetate fibers and studies on its application in filtration of cigarette smoke [D]. Shanghai: College of Textiles, Donghua University, 2006: 26-28. (In Chinese)
- [6] 王纯凤, 高卫东, 王鸿博. 卷烟滤嘴用醋酸纤维的过滤机制与过滤性能的提高[J]. 人造纤维, 2003, 33(4): 23-25.
WANG Chun-feng, GAO Wei-dong, WANG Hong-bo. Improvement for filtration mechanisms and performance of cellulose acetate in cigarette filter[J]. Artificial Fibre, 2003, 33(4): 23-25. (In Chinese)
- [7] 汪秋安, 王明峰, 者为, 等. 固相微萃取法测定卷烟主流烟气中的游离烟碱[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2011, 38(11): 70-75.
WANG Qiu-an, WANG Ming-feng, ZHE Wei, *et al.* Determination of free-base nicotine in main-stream cigarette smoke by HS-SPME GC/MS[J]. Journal of Hunan University: National Sciences, 2011, 38(11): 70-75. (In Chinese)
- [8] 王进, 杨占平, 曹建华, 等. 壳聚糖改性醋纤滤嘴对烟碱和焦油的吸附效果[J]. 无锡轻工大学学报, 2004, 23(5): 34-37.
WANG Jin, YANG Zhan-ping, CAO Jian-hua, *et al.* The influences of chitosan on nicotine and tar in mainstream tobacco smoke[J]. Journal of Wuxi University of Light Industry, 2004, 23(5): 34-37. (In Chinese)
- [9] 李艳平, 文建辉, 彭斌, 等. 不同结构滤嘴的烟碱截留效率和空间分布模式[J]. 烟草科技, 2013(2): 57-61.
LI Yan-ping, WEN Jian-hui, PENG Bin, *et al.* Filtration efficiencies and spatial distribution patterns of nicotine in filters of different structure[J]. Tobacco Science & Technology, 2013(2): 57-61. (In Chinese)
- [10] 李珊红, 唐奇, 李彩亭, 等. 普通醋纤香烟滤嘴中烟碱分布模拟研究[J]. 环境工程学报, 2015, 9(8): 3955-3959.
LI Shan-hong, TANG Qi, LI Cai-ting, *et al.* Study nicotine distribution in ordinary acetate fiber cigarette filter tip[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(8): 3955-3959. (In Chinese)
- [11] COGGINS C R E, GAWORSKI C L. Could charcoal filtration of cigarette smoke reduce smoking-induced disease? A review of the literature[J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2008, 50(3): 359-365.
- [12] 杨林, 付海明, 李杰, 等. 单纤维对惯性颗粒稳态过滤捕集效率的数值模拟分析[J]. 东华大学学报: 自然科学版, 2014, 40(3): 345-349.
YANG Lin, FU Hai-ming, LI Jie, *et al.* Numerical simulation analysis of stationary collection efficiency of inertial particles on single fiber surface[J]. Journal of Donghua University; Natural Science, 2014, 40(3): 345-349. (In Chinese)
- [13] 张政, 谢灼利. 流体-固体两相流的数值模拟[J]. 化工学报, 2001, 52(1): 1-12.
ZHANG Zheng, XIE Zhuo-li. Numerical simulation of fluid-solid two-phase flows[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2001, 52(1): 1-12. (In Chinese)
- [14] COKLJAT D, SLACK M, VASQUEZ S A, *et al.* Reynolds-stress model for Eulerian multiphase [J]. Progress in Computational Fluid Dynamics, 2006, 6(1/3): 168-178.
- [15] CHEN Yan-jun, LI Yuan-yang, LIU Zhen-hua. Numerical simulations of forced convection heat transfer and flow characteristics of nanofluids in small tubes using two-phase models [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 78(7): 993-1003.
- [16] MOUSAZADEH F, AKKER H E A, MUDDE R F. Eulerian simulation of heat transfer in a trickle bed reactor with constant wall temperature [J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 207(10): 675-682.
- [17] 王海霞. 亚微米气溶胶的粒径谱及其中多环芳烃的研究[D]. 大连:中国科学院大连化学物理研究所, 2007: 40-51.
WANG Hai-xia. Studies on the size distribution and polycyclic aromatic hydrocarbon contents of submicron aerosols [D]. Dalian: Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2007: 40-51. (In Chinese)
- [18] 杨占平, 李海峰, 陆书明, 等. 合纤丝滤棒吸阻等效模型及其波动分析初探[J]. 过滤与分离, 2013, 23(3): 5-8.
YANG Zhan-ping, LI Hai-feng, LU Shu-ming, *et al.* Equivalent model of fiber tow filter tips and fluctuations analysis of pressure drop[J]. Journal of Filtration & Separation, 2013, 23(3): 5-8. (In Chinese)
- [19] 田保中, 郭恒勇. 模拟燃吸香烟过程中蚕丝过滤嘴内部温度变化[J]. 纺织学报, 2011, 32(3): 21-24.
TIAN Bao-zhong, GUO Heng-yong. Change of temperature inside silk filter tip in course of simulating someone smoking cigarette[J]. Journal of Textile Research, 2011, 32(3): 21-24. (In Chinese)
- [20] 许保鑫. 复合滤嘴吸附性能的热脱附研究[D]. 昆明:昆明理工大学化学工程学院, 2007: 3-5.
XU Bao-xin. Thermodesorption study on adsorbability of active carbon composite filter[D]. Kunming: Faculty of Chemical Engineering, Kunming University of Science and Technology, 2007: 3-5. (In Chinese)
- [21] MANINER D C, ASHLEY M, SHEPPERD C J, *et al.* Mouth level smoke exposure using analysis of filters from smoked cigarettes: a study of eight countries[J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2011, 61(3Suppl): S39-S50.