

不同温度条件下烟丝—发烟剂体系热物性研究
Study on thermophysical properties of tobacco and smoke
agent under different temperature

马亚萍¹ 刘朝贤¹ 王 乐¹ 张明建¹ 张 柯¹

MA Ya-ping¹ LIU Chao-xian¹ WANG Le¹ ZHANG Ming-jian¹ ZHANG Ke¹
邓 楠¹ 鲁端峰¹ 汤建国² 刘向真³

DENG Nan¹ LU Duan-feng¹ TANG Jian-guo² LIU Xiang-zhen³

(1. 中国烟草总公司郑州烟草研究院, 河南 郑州 450001; 2. 云南中烟工业有限责任公司, 云南 昆明 650231;
3. 河南中烟工业有限责任公司, 河南 郑州 450000)

(1. Zhengzhou Tobacco Research Institute of CNTC, Zhengzhou, Henan 450001, China;
2. China Tobacco Yunnan Industrial Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650231, China;
3. Technology Ceter, China Tobacco Henan Industrial Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450000, China)

摘要:采用瞬态平面热源法对加热非燃烧烟草制品的烟丝—发烟剂(丙三醇与丙二醇质量比 5:1)体系的热物性进行研究,分析含水率和发烟剂含量对再造烟叶丝和烤烟丝热物性的影响。结果表明,随温度(22~75℃)的升高,烟草物料导热系数增大[再造烟叶丝 0.06~0.12 W/(m·K)、烤烟丝 0.06~0.16 W/(m·K)],热扩散系数减小(再造烟叶丝 0.33~0.05 mm²/s、烤烟丝 0.40~0.09 mm²/s),体积热容增大[再造烟叶丝 0.17~2.70 MJ/(m³·K)、烤烟丝 0.15~1.45 MJ/(m³·K)];随含水率(湿基含水率 0%~13%)的增大,烟草物料导热系数增大、热扩散系数减小、体积热容增大;随发烟剂含量(0%~25%)的增大,烟草物料导热系数呈增大趋势,但变化很小[再造烟叶丝增大 0.005 W/(m·K),烤烟丝增大 0.006 W/(m·K)],热扩散系数减小(再造烟叶丝减小 0.069 mm²/s,烤烟丝减小 0.069 mm²/s),体积热容增大[再造烟叶丝增大 0.106 MJ/(m³·K),烤烟丝增大 0.138 MJ/(m³·K)]。

关键词:含水率;发烟剂含量;导热系数;热扩散系数;体积热容
Abstract: The thermophysical properties of tobacco and smoke agent (the mass ratio of glycerol and propylene glycol is 5:1) was measured by transient plane heat source method, and the effects of moisture and smoke agent content on reconstituted cut tobacco and flue-cured were measured. The results showed that with the increase of temperature (22~75℃), thermal conductivity [0.06~0.12 W/(m·K) and 0.06~0.16 W/(m·K)] and volume heat capacity [0.17~2.70 MJ/(m³·K) and 0.15~1.45 MJ/(m³·K)] increased; however, the thermal diffusivity decreased (0.33~0.05 mm²/s and 0.40~0.09 mm²/s, respectively). With the increase of moisture content (0%~13%), the thermal conductivity and the volume heat capacity of tobacco materials increased, however, the thermal diffusivity decreased. With the increase of smoke agent content (0%~25%), the thermal conductivity of tobacco material [0.005 W/(m·K) and 0.006 W/(m·K)], the volume heat [0.106 MJ/(m³·K) and 0.138 MJ/(m³·K)] increased slightly, but the thermal diffusivity decreased (0.069 mm²/s and 0.069 mm²/s, respectively).

基金项目:中国烟草总公司重点实验室项目(编号:110201503001);中国烟草总公司科技重大专项项目(编号:110201401018);云南省科技计划青年项目(编号:2017FD238)

作者简介:马亚萍,女,中国烟草总公司郑州烟草研究院在读硕士研究生。

通信作者:鲁端峰(1979—),男,中国烟草总公司郑州烟草研究院高级工程师,博士。E-mail:05498119@163.com

收稿日期:2017-05-04

ured by transient plane heat source method, and the effects of moisture and smoke agent content on reconstituted cut tobacco and flue-cured were measured. The results showed that with the increase of temperature (22~75℃), thermal conductivity [0.06~0.12 W/(m·K) and 0.06~0.16 W/(m·K)] and volume heat capacity [0.17~2.70 MJ/(m³·K) and 0.15~1.45 MJ/(m³·K)] increased; however, the thermal diffusivity decreased (0.33~0.05 mm²/s and 0.40~0.09 mm²/s, respectively). With the increase of moisture content (0%~13%), the thermal conductivity and the volume heat capacity of tobacco materials increased, however, the thermal diffusivity decreased. With the increase of smoke agent content (0%~25%), the thermal conductivity of tobacco material [0.005 W/(m·K) and 0.006 W/(m·K)], the volume heat [0.106 MJ/(m³·K) and 0.138 MJ/(m³·K)] increased slightly, but the thermal diffusivity decreased (0.069 mm²/s and 0.069 mm²/s, respectively).

Keywords: moisture content; smoke agent content; thermal conductivity; thermal diffusivity; volume heat capacity

加热非燃烧烟草制品是一种新类型的烟草制品。通过特殊的加热源对烟丝进行加热,加热时烟丝中的尼古丁及香味物质通过挥发产生烟气来满足吸烟者需求,由于其烟气中有害物含量较低而得到社会广泛关注。按热源不同此类烟草制品主要包括电加热型、碳加热型、理化反应加热型及其他热源型制品。

加热非燃烧型烟草制品,已经经历了近 30 年的发展,它从原理上改变了传统卷烟的燃烧方式。研究发现^[1-4],与传统卷烟(1R4F)相比,加热非燃烧卷烟焦油等燃烧产物较少,苯并(a)芘、N-硝基胍、酚类化合物、乙醛、丙烯醛、氰化氢

和 *N*-杂环化合物降低了 90%~99%，尼古丁和一氧化碳的产率小于市售卷烟的 95% 和 75%，遗传毒性显著降低。杨继等^[5-6]研究了空气氛围下典型电加热和炭加热新型卷烟材料的挥发性，吡嗪和呋喃酮类的释放量低于传统卷烟。

烟草物料在受热过程中，其导热系数、热扩散系数和体积热容等热物性与物料温度变化状态紧密相关，是进行传热现象和烟气产生机制分析的重要基础。瞬态平面热源法广泛用于木材、孜然籽和烟草等热敏性物质材料热物性的研究^[7-10]。陈则韶等^[11-13]用平面热源过渡态平板法测定了烟草的热物性，研究了不同烟草类型热物性与含水率、堆密度等的关系。韩莹^[14]、林慧等^[15]采用瞬态平面热源法测量烟草热物性，研究烟草类型、产区、堆密度、温度和含水率等对烟草热物性的影响规律，并建立相应的导热系数模型。新型烟草制品发烟剂主要为甘油、丙二醇，有学者^[16-17]对添加了甘油等的卷烟烟丝的保润性能做了相关研究，但关于此类物料体系的热物性研究仍较缺乏，影响了对新型烟草发烟机理的深入认识。

本试验以再造烟叶丝和烤烟丝为烟草原料，采用甘油、丙二醇作为发烟剂，通过 TPS 测量方法考察烟草一发烟剂体系在不同温度条件下导热系数、热扩散系数与体积热容变化规律，同时基于表面接触理论建立了烟草一发烟剂体系导热系数预测模型。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

以法国摩迪再造烟叶丝与云南云烟 87 C₃F 烤烟叶丝为原料；

甲醇、丙三醇、丙二醇、丁二醇、乙醇、正己烷、卡尔费休试剂；AR 级，天津市科密欧化学试剂有限公司；

HOT-DISK 热常数分析仪；2500S 型，瑞典 Hot Disk 公司；

电子天平；PL3001-S 型，瑞士 Mettler 公司；

电热恒温鼓风干燥箱；DHG-9623A 型，上海精宏实验设备有限公司；

气相色谱；5890 型，安捷伦科技有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 测量原理 瞬态平面热源法测定材料热物性的原理

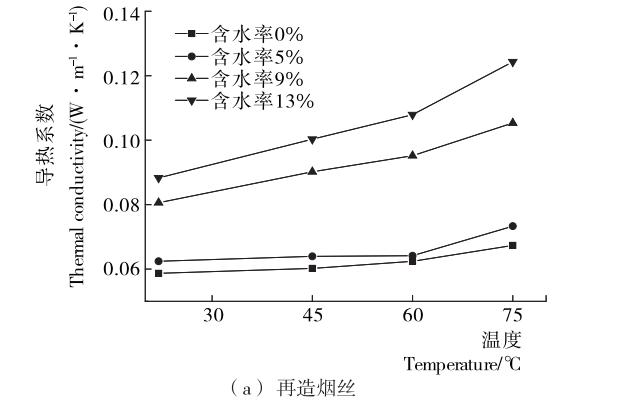


Figure 1 The variation of the thermal conductivity of reconstituted cut tobacco and flue-cured tobacco

是基于无限大介质中阶跃加热的圆盘形热源产生的瞬态温度响应，通过记录一段时间内探头温度感应与时间的关系，可以较为准确地得到热物性参数。

1.2.2 水分和发烟剂含量的测定

(1) 水分含量：按 GB/T 23203.2—2008 执行。

(2) 发烟剂含量：按 YC/T 243—2008 执行。

1.2.3 热物性的测量 称取一定量的烟丝，均匀装入样品仓中，制成干基堆积密度为 0.158 g/cm³ 的烟丝样品，放入恒温装置中平衡温度 3 h，用 TPS 热常数分析仪测定导热系数、热扩散系数和体积热容。分别考察不同温度 (22, 45, 60, 75 °C) 和含水率 (0%, 5%, 9%, 13%) 对烟草一发烟剂体系热物性的影响；常温条件下，研究发烟剂含量 (0%~30%) 对烟草体系热物性的影响。

2 结果与讨论

2.1 温度与含水率对烟丝一发烟剂体系热物性的影响

由图 1~3 可知：随温度的升高，再造烟叶丝和烤烟丝的导热系数增大、热扩散系数减小、体积热容增大；随含水率的增大，再造烟叶丝和烤烟丝的导热系数增大、热扩散系数减小、体积热容增大。在 22~75 °C 时，绝干再造烟叶丝和烤烟丝的导热系数和体积热容分别为 0.058~0.067 W/(m·K) 和 0.17~0.32 MJ/(m³·K)，查阅文献^[18]可知，水的导热系数和体积热容分别为 0.603~0.670 W/(m·K) 和 4.17~4.08 MJ/(m³·K)。烟丝可看成是由烟丝固体骨架、水和空气的串并联组合，温度增大，烟丝骨架、空气和水的导热系数增大，所以总的导热系数增大；体积热容由各组分的体积热容决定，温度增大，烟丝、空气体系体积热容增大，水的体积热容减小，烟丝、空气体积热容的增大速率大于水的体积热容减小的速率，总的效果是温度增大，体积热容增大。

2.2 发烟剂含量对烟丝一发烟剂体系热物性的影响

在干基堆积密度 0.158 g/cm³ 的条件下，研究常温下发烟剂含量对再造烟叶丝和烤烟丝热物性的影响和温度对烟丝一发烟剂体系热物性的影响。

2.2.1 常温条件下发烟剂含量对烟丝一发烟剂体系热物性的影响

由图 4~6 可知，随发烟剂含量增大，再造烟叶丝和烤烟丝导热系数呈增大的趋势，但增大的很少，热扩散系数

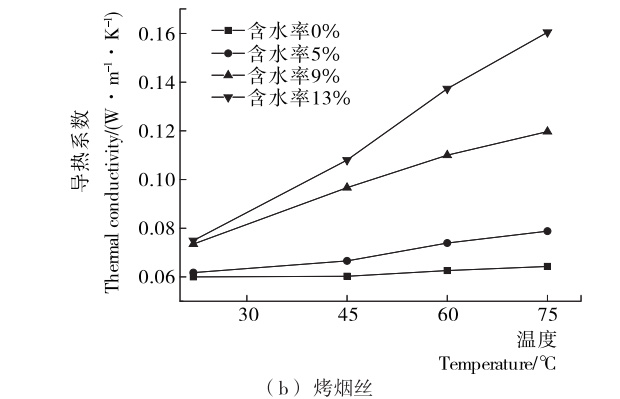


Figure 1 The variation of the thermal conductivity of reconstituted cut tobacco and flue-cured tobacco

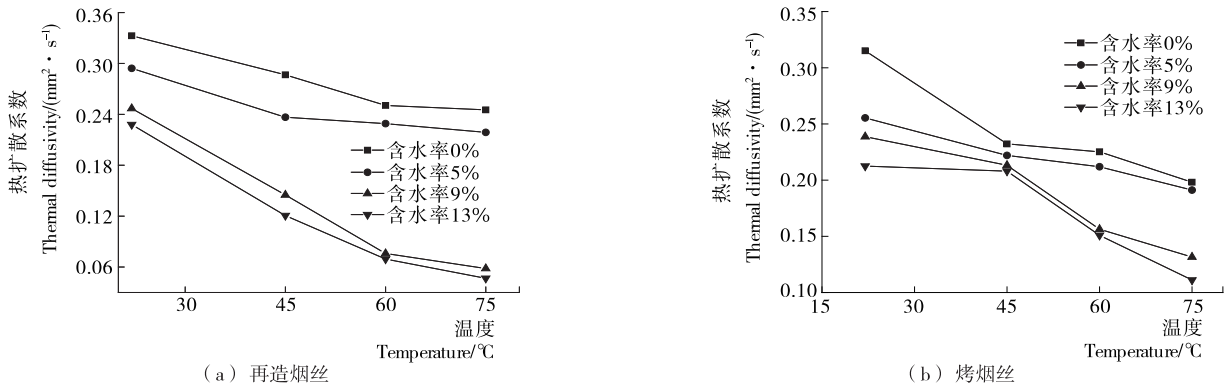


图 2 再造烟叶丝和烤烟丝热扩散系数的变化

Figure 2 The variation of the thermal diffusivity of reconstituted cut tobacco and flue-cured tobacco

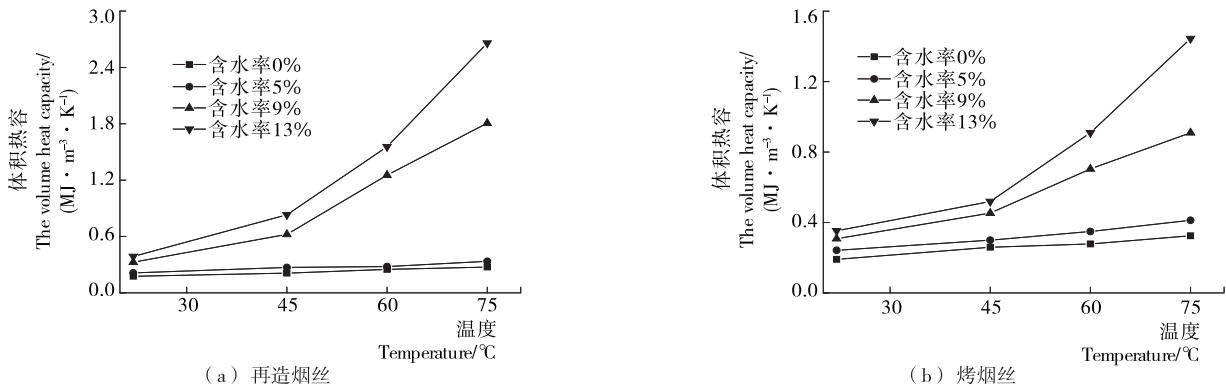


图 3 再造烟叶丝和烤烟丝体积热容的变化

Figure 3 The variation of the volume heat capacity of reconstituted cut tobacco and flue-cured tobacco

减小,体积热容增大。相同温度、堆积密度、发烟剂含量和含水率的再造烟叶丝和烤烟丝,其导热系数的不同主要是因为内在组分的不同和烟丝长度的不同。可以看出,发烟剂对再造烟叶丝和烤烟丝的导热系数影响很小。22℃时,水和丙三醇的导热系数和体积热容都远大于空气,热扩散系数远小于空气,所以含水率和发烟剂含量增大,导热系数和体积热容增大,热扩散系数减小。

2.2.2 不同温度下发烟剂含量对烟丝—发烟剂体系热物性的影响 由图 7~9 可知,随温度的升高,再造烟丝和烤烟丝的导热系数增大、热扩散系数减小、体积热容增大。由表 1 可知,水和丙三醇的导热系数随温度的升高而增大,前已述及烟丝—空气导热系数随温度的升高而增大,所以烟丝—发

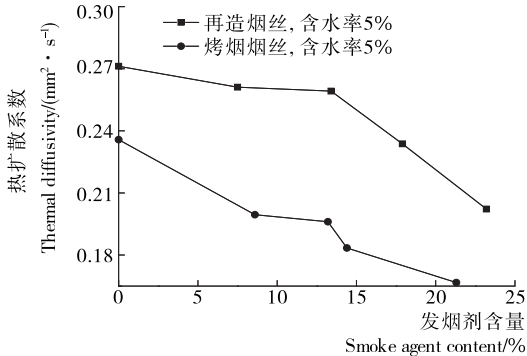


图 5 22℃时再造烟叶丝和烤烟烟丝热扩散系数
Figure 5 The thermal diffusivity of reconstituted cut tobacco and flue-cured tobacco at 22℃

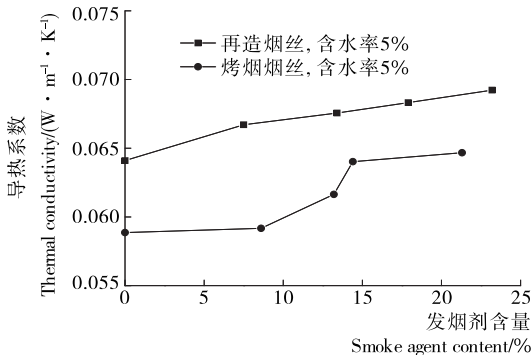


图 4 22℃时再造烟叶丝和烤烟烟丝导热系数
Figure 4 The thermal conductivity of reconstituted cut tobacco and flue-cured tobacco at 22℃

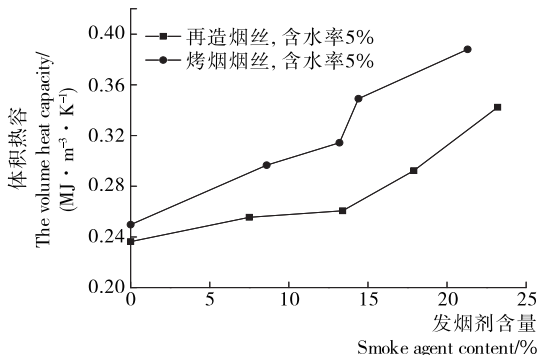


图 6 22℃时再造烟叶丝和烤烟烟丝体积热容
Figure 6 The volume heat capacity of reconstituted cut tobacco and flue-cured tobacco at 22℃

烟剂体系导热系数随温度的升高而增大;水的体积热容随温度的升高而减小,丙三醇的体积热容随温度的升高而增大,烟丝—空气体积热容随温度的升高而增大,并且水在温度较高的条件下易挥发而造成体积热容虚拟快速增大,综合效

果,随温度的升高,烟丝—发烟剂体系体积热容增大。
2.3 导热系数模型的建立
采用 W.Jackson 表面接触模型结合热阻法建立简化条件下烟丝—发烟剂体系导热系数的预测模型^[19],建立常温

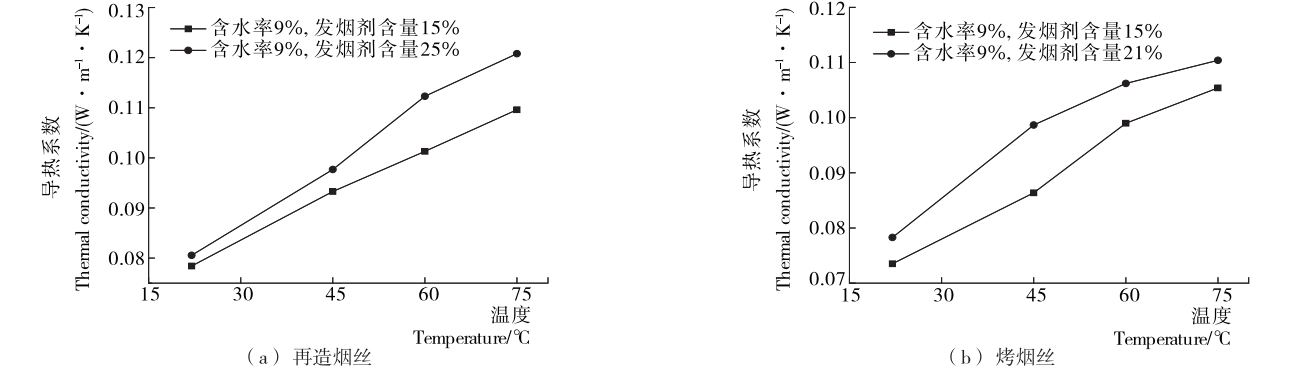


图 7 再造烟叶丝和烤烟丝导热系数的变化
Figure 7 The variation of the thermal conductivity of reconstituted cut tobacco and flue-cured tobacco

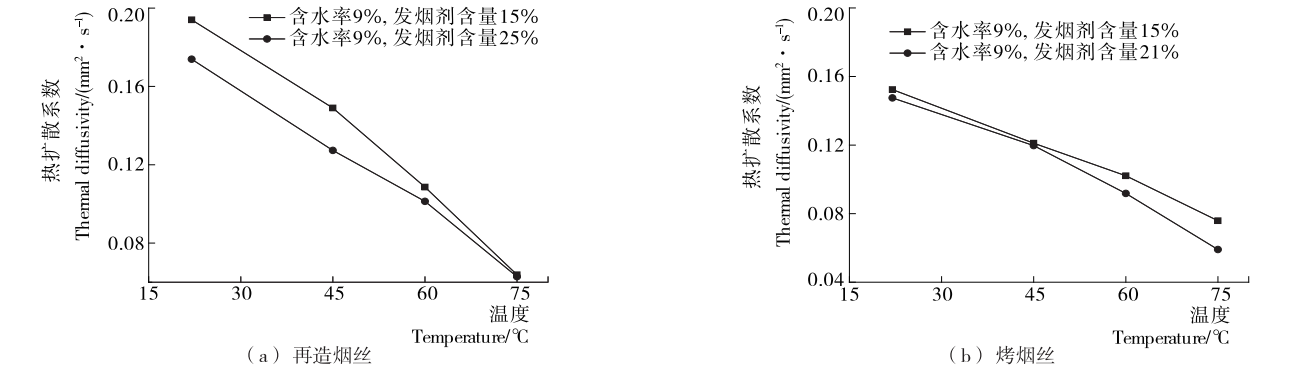


图 8 再造烟叶丝和烤烟丝热扩散系数的变化
Figure 8 The variation of the thermal diffusivity of reconstituted cut tobacco and flue-cured tobacco

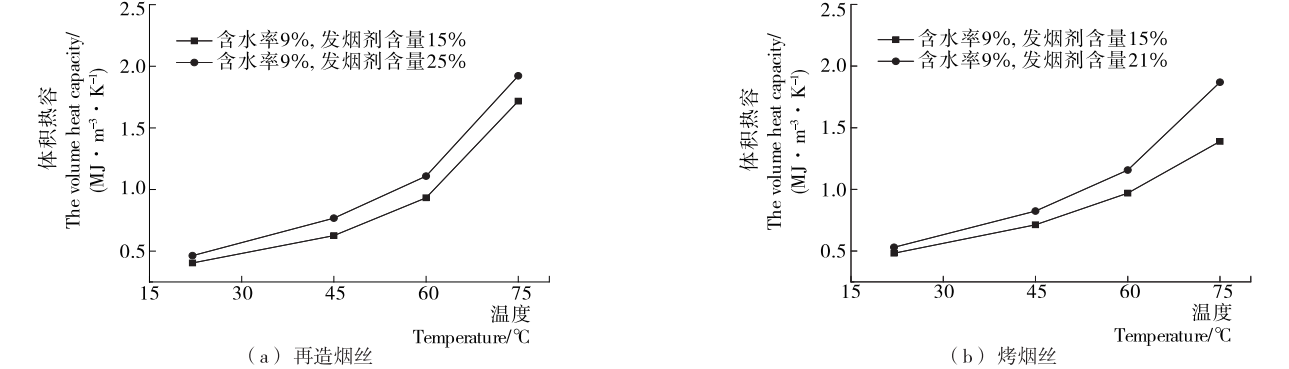


图 9 再造烟叶丝和烤烟丝体积热容的变化
Figure 9 The variation of the volume heat capacity of reconstituted cut tobacco and flue-cured

表 1 不同温度下纯物质导热系数和体积热容^[18]
Table 1 Thermal conductivity and thermal diffusivity of pure material at different temperatures

温度/℃	空气		水		丙三醇	
	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	体积热容/ (MJ·m ⁻³ ·K ⁻¹)	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	体积热容/ (MJ·m ⁻³ ·K ⁻¹)	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	体积热容/ (MJ·m ⁻³ ·K ⁻¹)
20	0.025 93	0.001 2	0.598	4.178	0.287 2	2.966
40	0.027 56	0.001 1	0.624	4.144	0.289 7	3.045
60	0.028 96	0.001 1	0.651	4.112	0.292 7	3.130
80	0.030 47	0.001 0	0.669	4.078	0.295 2	3.208

条件下烟丝—水,发烟剂—空气三相混合体的导热系数模型,见式(1)。

$$\frac{\lambda_{\text{总}}}{\lambda_a} = C_{aa} + \frac{C_{a\beta}^2}{C_{a\beta} - \varphi_{\beta} + \frac{\lambda_a}{\lambda_{\beta}} \times \varphi_{\beta}} + \frac{C_{a\gamma}^2}{C_{a\gamma} - \varphi_{\gamma} + \frac{\lambda_a}{\lambda_{\gamma}} \times \varphi_{\gamma}} \tag{1}$$

当烟丝含水率为零时, $C_{a\beta} = 0$,得

$$\frac{\lambda_{\text{总}}}{\lambda_a} = C_{aa} + \frac{C_{a\gamma}^2}{C_{a\gamma} - \varphi_{\gamma} + \frac{\lambda_a}{\lambda_{\gamma}} \times \varphi_{\gamma}} \tag{2}$$

式中:

C_{aa} ——堆积烟丝固相与固相接触度,%;

$C_{a\beta}$ ——堆积烟丝固相与液相接触度,%;

$C_{a\gamma}$ ——堆积烟丝固相与气相接触度,%;

$\varphi_a, \varphi_{\beta}, \varphi_{\gamma}$ ——堆积烟丝中固相、液相、气相体积分数,%;

λ ——被测材料导热系数, $W/(m \cdot K)$ 。

其中烟丝骨架导热系数可以用两相散乱堆积体几何平均模型 $\lambda = \lambda_a^{1-\epsilon} \lambda_{\gamma}^{\epsilon}$ 计算得到。 ϵ 为绝干烟丝占整体堆积烟丝体积的体积分数,需要测定绝干烟丝的表观密度进而求的堆积烟丝骨架体积。试验测定再造烟叶丝的表观密度 1.49 g/cm^3 ,烤烟烟丝表观密度 1.10 g/cm^3 ,计算得再造烟叶丝和烤烟烟丝骨架导热系数为 $7.131, 1.114\text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 。

图 10 为再造烟叶丝和烤烟丝试验值和模拟值比较,二者平均偏差为 $0.003\ 9$,相对偏差在 10% 以内。

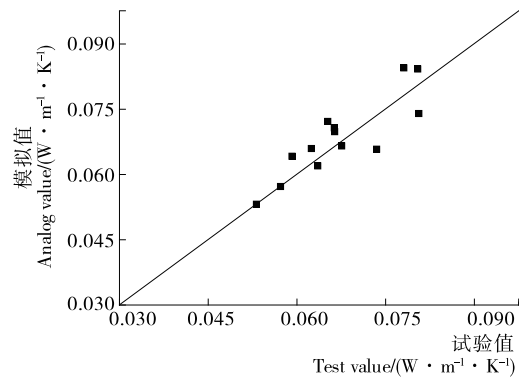


图 10 烟丝导热系数试验值和模拟值

Figure 10 Experimental and simulated values of thermal conductivity of tobacco

3 结论

随温度($22\sim75\text{ }^{\circ}\text{C}$)的升高,烟草物料导热系数增大(再造烟叶丝增大 100% ,烤烟丝增大 167%)、热扩散系数减小(再造烟叶丝减小 85% ,烤烟丝减小 78%)、体积热容增大(再造烟叶丝增大 15 倍,烤烟丝增大 9 倍);常温条件下,随发烟剂含量($0\%\sim25\%$)的增大,烟草物料导热系数呈增大趋势,但变化很小(再造烟叶丝增大 8% ,烤烟丝增大 10%),热扩散系数减小(再造烟叶丝减小 26% ,烤烟丝减小 29%),体积热容增大(再造烟叶丝增大 44% ,烤烟丝增大 55%)。基于串并联分析的物料导热模型同样适用于烟丝—发烟剂物料体系,并且能得到较好的预测效果。

参考文献

[1] DEBETHIZY J D, BORGERDING M F, DOOLITTLE D J, et al. Chemical and biological studies of a cigarette that heats rather than burns tobacco[J]. The Journal of Clinical Pharmacology, 1990, 30(8): 755-763.

[2] COGGINS C R E, AYRES P H, MOSBERG A T, et al. Ninety-day inhalation study in rats, comparing smoke from cigarettes that heat tobacco with those that burn tobacco[J]. Fundamental and Applied Toxicology, 1989, 13(3): 460-483.

[3] COGGINS C R E, AYRES P H, MOSBERG A T, et al. Comparative inhalation study in rats, using a second prototype of a cigarette that heats rather than burns tobacco[J]. Inhalation Toxicology, 1989, 1(3): 197-226.

[4] BROWN B, KOLESAR J, LINDBERG K, et al. Comparative studies of DNA adduct formation in mice following dermal application of smoke condensates from cigarettes that burn or primarily heat tobacco[J]. Mutat Res, 1998, 414(1/2/3): 21-30.

[5] 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.

[6] 杨继, 汤建国, 尚善斋, 等. 利用顶空-GC/MS 法对比新型卷烟和传统卷烟的挥发性成分[J]. 烟草科技, 2015, 48(11): 33-39.

[7] GUSTAFSSON S E, KARAWACKI E, CHOCHAN M A. Thermal transport studies of electrically conducting materials using the transient hot-stripe technique[J]. Phys J. D: Appl. Phys., 1986(19): 727-735.

[8] SULEIMAN B M, LARFELDT J, LECKNER B, et al. Thermal conductivity and diffusivity of wood[J]. Wood Science and Technology, 1999, 33(6): 465-473.

[9] SINGH K K, GOSWAMI T K. Thermal properties of cumin seed[J]. Journal of Food Engineering, 2000, 45(4): 181-187.

[10] GUO W, LIM C J, BI X, et al. Determination of effective thermal conductivity and specific heat capacity of wood pellets[J]. Fuel, 2013, 103: 347-355.

[11] 陈则韶, 郭俊成, 贾磊, 等. 用平面热源过渡态平板法同时测定烟叶的 λ , α 和 cp 三种热物性[J]. 中国科学技术大学学报, 2002, 32(3): 309-313.

[12] 陈则韶, 贾磊, 谭洋, 等. 烟草导热系数与含水率的变化关系[J]. 中国科学技术大学学报, 2003, 33(1): 92-98.

[13] 陈则韶, 陈建新, 谭洋, 等. 烟草导热系数与含水率, 堆密度的综合关系[J]. 中国科学技术大学学报, 2005, 35(1): 124-129.

[14] 韩莹. 利用瞬态平面热源法测量烟丝三种热物性研究[D]. 郑州: 中国烟草总公司郑州烟草研究院, 2009: 3-10.

[15] 林慧, 堵劲松, 李斌, 等. 基于 TPS 法的烟叶热物性测试及其导热系数预测模型的建立[J]. 河南农业科学, 2014, 43(2): 155-160.

[16] 徐迎波, 陈开波, 徐志强, 等. 卷烟烟丝食用蜡复配保润剂的保润性能及应用[J]. 食品与机械, 2017, 33(2): 179-182.

[17] 郭磊, 苏加坤, 罗娟敏, 等. 国内外品牌卷烟中的糖类和多元醇的 HPLC 法同时测定[J]. 食品与机械, 2016, 32(3): 73-76.

[18] 刘光启. 化学化工物性数据手册: 有机卷[M]. 马连湘, 刘杰. 北京: 化学工业出版社, 2012: 1-263.

[19] 韩莹, 闫亚明, 刘朝贤, 等. 利用瞬态平面热源法检测烟丝热物性的方法[J]. 烟草科技, 2009(9): 11-14.