

# 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

林 慧<sup>1</sup>, 堵劲松<sup>1</sup>, 李 斌<sup>1</sup>, 朱文魁<sup>1\*</sup>, 杨得强<sup>2</sup>

(1. 郑州烟草研究院 烟草工艺重点实验室, 河南 郑州 450001;

2. 江西中烟工业有限责任公司 南昌卷烟厂, 江西 南昌 330096)

**摘要:** 为了准确获取烟叶热物性参数, 指导实际烟叶初烤等加工过程工艺参数优化, 采用瞬态平面热源法(TPS)对不同含水率及温度条件下的烟丝热物性参数进行了测试分析, 并根据测试结果建立了烟叶导热系数的预测模型。结果表明: TPS法可较好地用于烟叶类生物质含湿多孔介质热物性分析, 测试精密度较高; 在 25~65℃、12.5%~22.5%含水率条件下, 烟丝导热系数随生物质含湿多孔介质的温度、含水率升高呈增大趋势, 体积热容变化与之类似; 烟丝导热系数预测模型可较准确地反映堆积烟丝导热系数与温度、含水率的关系, 模型预测值与实测值具有良好的线性相关性, 相关系数为 0.992, 最大偏差不超过 4.46%。

**关键词:** 烟叶; 热物性; 导热系数; 预测模型; TPS法

中图分类号: TS44 文献标志码: A 文章编号: 1004-3268(2014)02-0155-06

## Thermal Properties Measuring of Tobacco Leaves Based on TPS Method and Construction of Thermal Conductivity Model

LIN Hui<sup>1</sup>, DU Jin-song<sup>1</sup>, LI Bin, ZHU Wen-kui<sup>1\*</sup>, YANG De-qiang<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Tobacco Processing, Zhengzhou Tobacco Research Institute, Zhengzhou 450001, China

2. Nanchang Cigarette Factory, China Tobacco Jiangxi Industrial Co., Ltd., Nanchang 330096, China)

**Abstract:** For the purpose of getting thermal properties in an efficient and accurate way and applying the measuring data to the actual heat processing, the thermal properties of tobacco leaf were investigated based on TPS method, and a prediction model of thermal conductivity was developed to characterize the relationship between thermal conductivity and temperature, moisture content, stacking states. Thermal properties of cut tobacco were measured within the temperature range of 25—65℃ and the moisture content range of 12.5%—22.5%. The results of multiple factor variance analysis showed that temperature, moisture content as well as their interaction had significant effect on the thermal conductivity and volumetric heat capacity. Thermal conductivity of cut tobacco increased with increasing temperature and moisture content. The effect of moisture content was more significant at higher temperature levels. Volumetric heat capacity showed a similar trend. There was a good linear correlation between the predicted and measured values of thermal conductivity, with the correlation coefficient of 0.992 and the maximum deviation less than 4.46%, which indicated the validity of thermal conductivity prediction model.

**Key words:** tobacco leaves; thermal properties; thermal conductivity; prediction model; transient plane source method

农产品加工过程中广泛涉及到生物质含湿多孔介质<sup>[1]</sup>物料的干燥与回潮初加工等, 如谷物、种

子、果蔬、烟叶及畜牧饲料等的干燥与回潮初加工等<sup>[2]</sup>。对生物质含湿多孔介质热物性的准确测定

收稿日期: 2013-10-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51306213)

作者简介: 林 慧(1988-), 女, 山东威海人, 在读硕士研究生, 研究方向: 烟草工艺。E-mail: huilztri@163.com

\* 通讯作者: 朱文魁(1979-), 男, 河南永城人, 副研究员, 博士, 主要从事烟草原料综合加工利用研究。

E-mail: zhu. wen. kui@163.com

及不同加工状态下导热系数变化的模型进行预测,是干燥、增温增湿等热湿加工过程模拟分析和工艺优化的关键。而物料与加工设备间的热传递特性、物料受热程度和温度变化均与其导热系数、体积热容等热物性参数密切相关。因此,准确测定生物质含湿物料热物性是该类物料热湿处理加工过程模拟分析、工艺参数优化和质量控制的前提,尤其是对热敏性物料加工过程质量安全控制具有重要意义。

测定材料热物性的方法分为稳态法和非稳态法。与稳态法相比,非稳态法具有快速、准确等诸多优点<sup>[3-4]</sup>,一次测量可同时得到多个参数,目前用非稳态法测试材料的热物性应用广泛。瞬态平面热源(transient plane source, TPS)法是近些年发展的一种材料热物性非稳态测试方法<sup>[5-7]</sup>,与传统热线法、热带法相比,其导热系数的测温范围更宽,测试精度也更高<sup>[8-11]</sup>。尽管目前 TPS 法已开始应用于岩土、硅胶、复合材料等物料热物性测试研究<sup>[12-15]</sup>,但其应用于农产品热物性研究的报道较少。由于农产品热湿加工较多涉及高含水量的多孔介质物料,这种含湿多孔介质热物性参数与其颗粒组成、含水率、孔隙率等因素密切相关<sup>[16-18]</sup>,而其热物性测试过程中水分易迁移散失,导致测试结果难以准确反映实际加工过程不同温湿度状态下的热物性<sup>[19-20]</sup>,尤其是较高温度测试条件下更为明显。烟叶作为典型的叶片基植物多孔介质,采收后要经过烟叶初烤、片烟复烤及烟丝干燥等多个环节的热加工过程。由于不同烟叶原料的热物性存在差异,加工过程中热工控制参数要求也不同。因此,准确获取烟叶热物性参数可为烟草加工工艺参数优化提供基础数据。基于此,参考实际烟叶初烤、片烟复烤等加工过程中烟草物料的温湿度变化趋势,根据物料由低温高含水率向高温低含水率变化的总体原则,建立恒温恒湿测试平台,采用 TPS 法对不同温度和含水率变化范围内烟叶原料热物性参数进行了测试分析,并根据测试结果研究建立其导热系数预测模型,以期对烟叶原料热物性测试和不同加工状态下的烟叶导热系数模型预测提供方法依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 供试材料与仪器

供试材料为 2012 年上部橘黄 2 级(B2F)烤烟,产区为四川凉山。

仪器主要为 PR-3KT 型调温调湿箱(日本爱斯

佩克环境仪器有限公司)、TPS(2500S)热常数分析仪(瑞典 Hot Disk 公司)、DHG-9623A 型电热恒温鼓风干燥箱(上海精宏实验设备有限公司)、AB204-S 电子天平(感量 0.1mg,瑞士 Mettler 公司)、HHS6 电热数字显示恒温水浴锅(上海浦东荣丰科学仪器有限公司)。

### 1.2 原料预处理及试验方法

片烟切丝后自然平衡到均匀的含水率,测定其含水率,根据设定的不同湿基含水率试验条件设定调温调湿箱湿度,将足量的试验烟丝均匀铺散于调温调湿箱内平衡 12 h,之后将烟丝密封于自封袋内置于恒温恒湿室内备用。试验前,采用五点法对烟丝含水率取样检测,以保证调湿平衡后烟丝的水分与设定的水分值基本保持一致,误差不超过 2%。

在烟丝的干燥和回潮加工过程中,物料温度一般在 70℃ 以内,湿基含水率约为 12.5%~22.5%。因此,烟丝导热系数模型构建试验中设定了 25、35、45、55、65℃ 5 个温度水平和 22.5%、20.0%、17.5%、15.0%、12.5% 5 个湿基含水率水平,测定烟丝在不同温度和含水率水平下的导热系数和恒压体积热容,每个试验条件下平行测试 6 次。导热系数模型验证试验设定了 30、40、50、60℃ 4 个温度水平和 13.1%、16.5%、17.5%、20% 4 个湿基含水率水平,每个试验条件下平行测试 4 次,取均值作为模型校验的实测值。同时,计算每个温度和含水率水平下的导热系数模型预测值。对比模型预测值与试验实测值,验证烟丝在不同温度和含水率水平下的导热系数模型的精度。

### 1.3 测试方法原理

非稳态法是对处于热平衡状态的试样施加某种热干扰,同时测量试样对热干扰的响应,根据响应曲线基于非稳态导热微分方程确定材料热物性参数数值的方法<sup>[21]</sup>。TPS 法测定材料热物性的原理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,其测试系统结构主要由恒流电源、电压测试单元、惠斯通电桥和 Hot Disk 探头组成。工作过程中,探头通过恒流电源、惠斯通电桥以恒定的输出功率加热试样,当探头通电加热时,其热阻与时间的函数为:

$$R(t) = R_0 \{1 + \alpha [\Delta T_i + \Delta T_{ave}(\tau)]\} \quad (1)$$

式中: $R_0$  是测试前测温探头的热阻, $\alpha$  是测试探头镍盘电阻的热阻系数, $\Delta T_i$  是保护层薄膜两侧的温度差, $\Delta T_{ave}(\tau)$  是依赖于时间的探头接触面物料层温度响应。

Hot Disk 探头既被用作加热热源又被用作温度传感器,测试与探头相接触的试样表面平均温度分布<sup>[22]</sup>。测试中由于温度升高导致探头电阻值发生变化,从而使探头两端的电压发生变化,通过记录在测试时间内电压的变化,可以得到探头的电阻值随时间的变化,进而利用电阻温度系数转换为探头表面的温升。将圆盘形探头与试样之间的热量交换视为有限尺度的面热源在无限大介质中的导热过程,采用格林函数法推导该二维平面热源非稳态导热问题<sup>[2]</sup>,可得到物料温升随时间的变化关系:

$$\Delta T_{axx}(\tau) = \frac{P_0}{\pi^{3/2} a \lambda} D(\tau) \quad (2)$$

式中:  $P_0$  是探头的输出总功率,  $a$  是探头的半径,  $\lambda$  是被测材料的导热系数,  $D(\tau)$  是无量纲时间函数,其中:

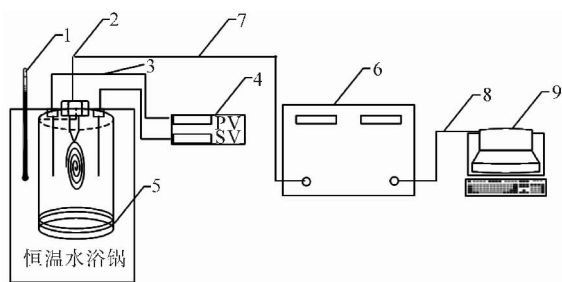
$$\tau = \sqrt{\frac{t}{\theta}}, t \text{ 是测试时间, } \theta \text{ 是特征时间} \quad (3)$$

$$\theta = \frac{a^2}{k}, k \text{ 是被测试样的热扩散系数} \quad (4)$$

通过变换不同的  $\tau$ ,用参数估计的方法拟合试验中的实测温升和按式计算的理论温升,当拟合直线的偏差平方和最小时,所取的就是计算所需要的最佳值,并由此可由相应的拟合直线的斜率求出导热系数。由公式(4)确定热扩散系数  $k$ ,根据公式  $k = \lambda / c$ ,计算体积热容  $c$ 。

#### 1.4 试验平台装置

为保证 TPS 测试的恒温恒湿要求,试验采用恒温水浴方法建立图 2 所示测试平台。将烟丝水分调制且平衡到设定含水率水平后,定量均匀装载在带有防水垫圈的铝制容器内,把探头置于试样中间形成夹层结构,容器内试样表面以防水材质盖板密封,防止测试过程烟丝水分迁移散失。将铝制容器置于恒温水浴锅内,用水银温度计测量容器壁面温度,2 根 K 型热电偶测试烟丝温度。



1. 水银温度计; 2. 高温测试探头; 3. K型热电偶;  
4. 温度显示器; 5. 防水橡皮垫圈; 6. TPS主机;  
7. GPIB测试数据线; 8. RS232线; 9. PC机

图1 恒温试验平台

试验前通过调节恒温水浴温度,使容器内烟丝温度稳定在待测水平。经试验,水浴温度高于烟丝体系  $10^{\circ}\text{C}$  左右,可保证测试过程中试验体系温度在测温点  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  范围内变化,满足恒温测定要求。同时,在容器内探头检测点附近对测试后的烟丝取样分析表明,在含水率最高为  $22.5\%$ 、测试温度最高为  $65^{\circ}\text{C}$  的测试条件下,烟丝测试前后含水率的变化仅为  $0.39\%$ ,即测试过程中烟丝水分迁移量较小,含水率相对稳定。由于烟草的导热系数偏小,经试验对比,输出功率选择  $0.025\text{ W}$ ,此时的数据稳定性最好。选取测试时间为  $70\text{ s}$ ,每组分析数据取点数不少于  $100$  个,以保证单次导热系数的代表性。

#### 1.5 数据分析

对热物性测定数据采用 matlab 7.0 (Math-Works 公司,美国)软件进行多因素方差分析,比较不同温度和含水率水平下测定结果的差异显著性,  $P > 0.05$  表示在  $0.05$  水平上差异不显著,  $P < 0.05$  表示在  $0.05$  水平上差异显著。

对导热系数预测模型的拟合求解采用半逆解法。结合试验测得的堆积烟丝导热系数随温度变化的数据,通过不断变化散体气固两相模型中的参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  值拟合求出不同温度下的烟丝骨架导热系数,当所求的烟丝骨架导热系数随温度的变化关系达到线性最优时,对应的  $a$ 、 $b$ 、 $c$  值即为所求解。

## 2 结果与分析

### 2.1 烟叶热物性测试结果及精密度分析

由表 1 可见,不同温度和含水率水平下所测烟丝导热系数水平介于  $0.079 \sim 0.199\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,重复测试的标准偏差在  $0.01\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  以下;体积热容水平介于  $0.328 \sim 0.935\text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ,标准偏差基本在  $0.1\text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$  以内。导热系数在同一含水率水平下随温度增加而增大,在同一温度水平下随含水率增加呈增大趋势。在  $65^{\circ}\text{C}$  的较高温度水平下,导热系数随含水率的变化更为明显,而温度对导热系数的影响在  $22.5\%$  的较高含水率水平下也更为明显。相同条件下,烟丝导热系数的测定结果均高于刘乃云等<sup>[23]</sup>采用恒热流准稳态平板法的测定范围,而与陈则韶等<sup>[24]</sup>平面热源过渡态平板法的测定范围相对接近。准稳态平板法测试时加热平板未被烟丝包裹导致部分热量向环境空气散失,可能是导致其与 TPS 法测试结果不同的原因之一,同时测试烟丝原料的性质和品种差异对测试结果也有影响。

以各条件下重复测定结果的标准偏差分析测试方法的精密度,导热系数和体积热容测试结果精度与各自热物性水平高低无依赖关系。可用不同条

件下标准差均值表示测试方法的重复性标准差,则导热系数重复性标准差为 0.004 54 W/(m·K),体积热容重复性标准差为 0.061 30 MJ/(m<sup>3</sup>·K)。

表 1 水浴恒温条件下不同含水率和温度烟丝的热物性参数

温度/℃	热物性参数	含水率/%				
		12.5	15.0	17.5	20.0	22.5
25	$\lambda$ / [W/(m·K)]	0.079±0.002	0.087±0.002	0.095±0.001	0.098±0.004	0.105±0.002
	$c$ / [MJ/(m <sup>3</sup> ·K)]	0.328±0.059	0.331±0.065	0.380±0.034	0.405±0.040	0.333±0.036
35	$\lambda$ / [W/(m·K)]	0.090±0.006	0.094±0.007	0.104±0.005	0.108±0.005	0.115±0.004
	$c$ / [MJ/(m <sup>3</sup> ·K)]	0.392±0.032	0.413±0.035	0.335±0.069	0.554±0.052	0.455±0.040
45	$\lambda$ / [W/(m·K)]	0.112±0.004	0.108±0.002	0.124±0.007	0.135±0.003	0.142±0.009
	$c$ / [MJ/(m <sup>3</sup> ·K)]	0.365±0.060	0.624±0.039	0.440±0.061	0.793±0.090	0.507±0.090
55	$\lambda$ / [W/(m·K)]	0.116±0.004	0.134±0.008	0.134±0.009	0.145±0.003	0.159±0.002
	$c$ / [MJ/(m <sup>3</sup> ·K)]	0.467±0.086	0.417±0.067	0.533±0.033	0.604±0.078	0.483±0.098
65	$\lambda$ / [W/(m·K)]	0.138±0.004	0.141±0.006	0.159±0.006	0.185±0.005	0.199±0.003
	$c$ / [MJ/(m <sup>3</sup> ·K)]	0.620±0.076	0.661±0.099	0.644±0.078	0.793±0.090	0.935±0.066

对不同温度、含水率条件下测得的热物性结果进行双因素方差分析,结果(以导热系数为例)表明,温度、含水率及其交互作用均是影响烟叶原料导热系数的极显著因素( $P<0.01$ )。

## 2.2 烟叶导热系数预测模型的建立

热物性参数中,物料的导热系数是影响热处理加工过程中最重要的参数。在实际干燥脱水、回潮增湿等加工过程中,随着物料的温度、水分及颗粒堆积状态的变化,导热系数也随之发生变化<sup>[25]</sup>。因此,建立可准确预测烟叶不同状态下导热系数的理论模型,是对烟叶实际生产热加工传热过程模拟分析和优化的基础。从堆积烟丝颗粒群和烟丝颗粒内部2个结构尺度入手(图5),分析建立堆积烟丝导热系数预测模型。

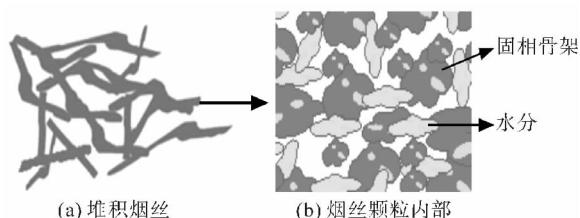


图 5 堆积烟丝与烟丝颗粒内物理结构模型示意

堆积状态下的烟丝由固、气两相构成,包括含湿烟丝固相与烟丝间气相,其导热系数受含湿固相导热系数、气相导热系数和堆积状态下的孔隙率共同影响。由于松散堆积烟丝处于连续非移动的气相中,可采用散体气固两相模型来分析表征松散堆积状态烟丝的导热系数。Krupiczka<sup>[26]</sup>假定多孔材料是由一束长圆柱体排列而成,用数值法求解了堆积

状态下包括固体颗粒间导热、流体对流换热和流体与固体颗粒间对换热过程的热平衡方程,得到了堆积多孔介质导热系数的散体气固两相模型近似解:

$$k_e = k_g (k_s/k_g)^{a-b\log(1-\epsilon)+c\log(k_s/k_g)} \quad (5)$$

式中  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为常数,  $k_e$  为堆积烟丝导热系数,  $k_g$  为气相导热系数,  $k_s$  为固相导热系数,  $\epsilon$  为堆积孔隙率,可通过测定烟丝堆积密度  $\rho_p$  和颗粒密度  $\rho_a$ ,由  $\epsilon = 1 - \rho_p/\rho_a$  换算得到。

烟丝含湿固相导热系数主要受内部固相烟丝骨架和填充在其间的液相水分共同作用<sup>[27]</sup>。在颗粒内部尺度上,烟丝等植物基生物质含湿颗粒为纤维类吸湿材料多孔介质,水分主要分布于颗粒内部骨架纤维包络形成的空隙中,可认为烟丝固相内水分与烟丝骨架呈随机散乱分布状态(图5b),采用 Tavyman 两相散乱堆积模型<sup>[28]</sup>:

$$k_s = k_w^{V_w} k_b^{(1-V_w)} \quad (6)$$

式中,  $k_s$  为固相导热系数,  $k_w$  为烟丝中水分导热系数,  $k_b$  为烟丝骨架导热系数,  $V_w$  为烟丝中水分体积分数。  $V_w$  可由水分密度  $\rho_w$ 、烟丝含水率  $W$  和骨架密度  $\rho_s$ ,由  $V_w = \rho_s W / [\rho_s W + \rho_w (1 - W)]$  换算得到。

固体材料其导热系数随温度而变,绝大多数质地均匀的固体导热系数与温度近似成线性关系<sup>[29]</sup>,即有:

$$k_b = k_{b0} (1 + dT) \quad (7)$$

$k_b$  为固体在温度  $T$  时的导热系数,  $k_{b0}$  为固体在温度 0℃时的导热系数。  $d$  为系数,对大多数非金属材料为正值。

对于(5)式中的气相导热系数  $k_g$  和(6)式中烟

丝中水分导热系数  $k_w$ , 可分别由 IAPWS 数据<sup>[30-31]</sup>拟合得到其与温度的关系式:

$$k_g = 7.8091 \times 10^{-5} T + 0.02409 \tag{8}$$

$$k_w = -1.18759 \times 10^{-5} T^2 + 0.025T + 0.5561 \tag{9}$$

将堆积烟丝颗粒群尺度上的散体气固两相模型与烟丝颗粒内部尺度上的骨架与水分散乱堆积模型结合, 并与(7)~(9)式联立, 即可求出不同水分和温度生物质含湿多孔介质堆积状态下的导热系数。

2.3 烟叶导热系数预测模型的预测结果分析

在测得的烟丝堆积密度为 250 kg/m<sup>3</sup>、颗粒密度为 1 084 kg/m<sup>3</sup> 和烟丝骨架密度为 1 311 kg/m<sup>3</sup> 条件下, 联立(5)~(9)式, 采用 1.4 所述半逆解法求出模型参数。当烟丝骨架导热系数与温度的线性拟合决定系数最高为 0.925 时(图 6), 求得模型参数  $a=0.0350$ ,  $b=0.0267$ ,  $c=0.6222$ ,  $k_{b0}=0.0794$ ,  $d=0.02267$ 。

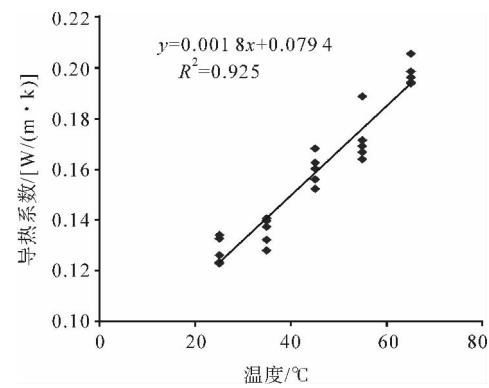


图 6 烟丝骨架导热系数随温度变化的线性拟合

由表 3 导热系数模型验证试验数据可见, 在试验范围内, 不同温度水平测试条件下所建立的预测模型对堆积烟丝导热系数的预测值与实测值均能较好吻合, 此时, 烟丝骨架导热系数拟合的线性相关系数为 0.982, 模型预测值与实测值线性相关系数为 0.992, 预测值与试验值最大偏差为 4.46%。

表 3 水浴恒温条件下不同含水率与温度烟丝导热系数的模型校验 W/(m·K)

温度/℃	含水率/%							
	13.1		16.5		17.5		20.0	
	实测值	模拟值	实测值	模拟值	实测值	模拟值	实测值	模拟值
30	0.08567	0.08509	0.09576	0.09157	0.09938	0.09494	0.10284	0.10393
40	0.10104	0.09849	0.10850	0.10654	0.11364	0.11074	0.12109	0.12199
50	0.11563	0.11248	0.12572	0.12220	0.12899	0.12730	0.13968	0.14096
60	0.12920	0.12703	0.14228	0.13852	0.14550	0.14455	0.16506	0.16078

3 结论与讨论

TPS 法对烟叶热物性测试结果表明, 烟叶导热系数随含水率和温度的增加均呈增大趋势, 较高温度水平下, 烟叶导热系数随含水率的变化更为明显, 而温度对导热系数的影响在 22.5% 的较高含水率水平下也更为明显。这是由于堆积状态烟丝温度升高导致烟丝本身的热传导以及烟丝颗粒之间的接触传热均增大, 气相导热也增强, 最终使得导热系数增大。这一现象与徐桂转等<sup>[32]</sup>、易维明等<sup>[33]</sup> 分别采用热线法和稳态平板法对稻壳、秸秆等生物质测试的结果一致。由于水的导热系数为 0.61 W/(m·K), 高于烟丝干基骨架导热系数, 含水率增加也导致烟丝颗粒的导热系数逐渐增大。而高温、高含水率条件下堆积烟丝体积热容也呈增大趋势主要与单位体积烟丝中水分增加及气相中湿度增大而导致的含湿固相和气相热容增加有关。

根据 TPS 法对烟叶热物性的测试结果, 从堆积

烟丝颗粒群和烟丝颗粒内部 2 个结构尺度入手, 分析建立了堆积烟丝导热系数预测模型。试验验证结果表明, 当烟丝含水率介于 12.5%~22.5%、温度介于 25~65 °C 时, 不同状态下导热系数模型预测值与实测值偏差均在 4.46% 以内。因此, 基于测试结果, 分析建立的堆积烟丝导热系数预测模型的预测值与实测值具有较强的线性相关性, 模型具有较好的预测准确性。综上可认为, 结合 TPS 法建立的恒温恒湿热物性测试平台方法可较好地适用于烟叶原料等含湿生物物质的热物性测试。由于烟叶采收后初加工及制丝加工环节要经历多次回潮、干燥热湿处理, 且烟叶原料的热物性是热湿处理工艺制定所必须的基础物性数据, 所以若可充分利用 TPS 测试平台简单、测试时间短、测定结果能够准确反映实际加工过程不同温湿度状态下加工对象热物性等优点, 在后续的研究中增加试验量与原料种类, 建立适合不同产区、品种、部位烟叶的热物性数据库, 可为今后烟草工业生产中不同烟叶原料热湿处理工艺选择

及加工参数优化调整提供参考依据。

此外,该方法也可借鉴应用于其他同类农产品加工过程。茶叶、种子、苜蓿等诸多农作物均属松散堆积的含湿生物物质,尤其是茶叶在加工工艺方面也与烟叶较相似,因此该测试方法及建立的导热系数模型对于多孔生物物质类农产品的加工<sup>[34-36]</sup>均具有较好的借鉴意义。

#### 参考文献:

- [1] 刘伟,范爱武,黄晓明. 多孔介质传热传质理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [2] 孙振钧. 中国生物质产业及发展取向[J]. 农业工程学报,2004,20(5):1-5.
- [3] 于帆,张欣欣,何小瓦. 材料热物性性能非稳态测量方法综述[J]. 宇航计测技术,2006,26(4):23-30.
- [4] 王铄,王全九,樊军,等. 土壤导热率测定及其计算模型的对比分析[J]. 农业工程学报,2012,28(5):78-84.
- [5] Gustafsson S E. Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurement of solid materials[J]. Rev Sci Instrum,1991,62(3):797-804.
- [6] Bohac V, Gustavasson M K, Kubicar L, *et al.* Parameter estimations for measurements of thermal transport properties with the hot disk thermal constants analyzer[J]. Rev Sci Instrum,2000,71(6):2452-2455.
- [7] He Y. Rapid thermal conductivity measurement with a hot disk sensor; Part 1. Theoretical considerations[J]. Thermochimica Acta,2005,436:122-129.
- [8] 龚红菊. 非稳态热线法测定大麦的导热系数[J]. 粮食与饲料工业,2003(10):48-49.
- [9] 张来林,李岩峰,毛广卿,等. 用热线法测定粮食的导热系数[J]. 粮食与饲料工业,2010(7):12-15.
- [10] 杨振萍,魏莎莎. 热线法测量材料热导率[J]. 大学物理,2007,26(7):40-42.
- [11] 于帆,张欣欣. 热线法测量材料导热系数的实验研究[J]. 计量学报,2005,26(1):27-29.
- [12] 赵秀峰,曹景洋,罗惠芬. 采用 Hot Disk 测量岩土热物性的实验研究[J]. 中国测试,2012,38(4):106-109.
- [13] 陈传涓,王如竹,夏再忠,等. 瞬态平面热源法测量硅胶混合吸附剂导热系数[J]. 工程热物理学报,2008,29(5):811-814.
- [14] Li Dong-liang, Du Jian-wei, He Song, *et al.* Measurement and modeling of the effective thermal conductivity for porous methane hydrate samples[J]. Science China Chemistry,2012,55(3):373-379.
- [15] 刘喆伟,徐红艳,沈同俊. 航天复合材料热导率测量的实验研究[J]. 低温工程,2010(1):22-24.
- [16] 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.
- [17] dos Santos W N. Effect of moisture and porosity on the thermal properties of a conventional refractory concrete[J]. Journal of European Ceramic Society,2003,23:745-755.
- [18] 肖衡林,吴雪洁,周锦华. 岩土材料导热系数计算研究[J]. 路基工程,2007,(3):54-56.
- [19] 张忠进,金文桂. 探针法测量农副产品导热系数的研究[J]. 农业机械学报,1997,28(1):94-97.
- [20] 张忠进,金文桂. 谷物导热系数测试的研究[J]. 农业工程学报,1995,11(1):151-155.
- [21] 贾力,方肇洪,钱兴华. 高等传热学[M]. 北京:高等教育出版社,2003:65-75.
- [22] 王强,戴景民,何小瓦. 基于 Hot Disk 方法测量热导率的影响因素[J]. 天津大学学报,2009,42(11):970-974.
- [23] 刘乃云,梅业安,常纪恒. 中国几种烟草热物性的研究[J]. 烟草学刊,1990(1):29-43.
- [24] 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  $\lambda$ 、 $\alpha$  和  $C_p$  三种热物性[J]. 中国科学技术大学学报,2002,32(3):309-313.
- [25] 罗伟,戴希碧. 含水量对谷物热传导性能的影响[J]. 安徽农业科学,2010,38(21):11453-11454,11456.
- [26] Krupiczka R. Analysis of thermal conductivity in granular material[J]. Chem Eng,1967,7(1):122-143.
- [27] 杨历,陶斌斌. 多孔介质干燥过程传热传质研究[J]. 农业工程学报,2005,21(1):27-31.
- [28] Tavman I H. Effective thermal conductivity of granular porous materials[J]. Int Comm Heat Mass Transfer,1996,23(2):169-176.
- [29] 陈敏恒,丛德滋,方图南,等. 化工原理[M]. 3 版. 北京:化学工业出版社,2008.
- [30] 马长永. 水和水蒸气导热系数及粘度值计算程序开发[J]. 工业锅炉,2009(3):9-11.
- [31] Iapws Secretariat. Revised release on the IAPS formulation 1985 for the thermal conductivity of ordinary water substance[R]. Palo Alto CA: Electric Power Research Institute,1998.
- [32] 徐桂转,梁新,岳建芝. 利用热线法对松散类生物物质导热系数的测试[J]. 可再生能源,2004(5):23-25.
- [33] 易维明,郭超,姚宝刚. 生物物质导热系数的测定方法[J]. 农业工程学报,1996,12(3):38-41.
- [34] 许小骏. 林业生物质能源发展现状及展望[J]. 山西农业科学,2008,36(8):88-89.
- [35] 章芸,陈秋波,邓燧. 我国生物质能源开发的研究与分析[J]. 现代农业科技,2007(12):172-176.
- [36] 王爱军,张燕,张小桃. 河南省农业生物质资源能源利用潜力分析[J]. 河南农业科学,2012,41(2):76-79.