

基于多维非稳态导热乘积法的粮粒热物性测定

Measurement of grain physical properties based on multi-dimensional unsteady thermal conduction product method

陈清华^{1,2}

苏国用¹

孙美华¹

姜阔胜^{1,2}

刘萍^{1,2}

CHEN Qing-hua^{1,2} SU Guo-yong¹ SUN Mei-hua¹ JIANG Kuo-sheng^{1,2} LIU Ping^{1,2}

(1. 安徽理工大学机械工程学院, 安徽 淮南 232001; 2. 智能矿山技术与装备安徽省重点实验室, 安徽 淮南 232001)

(1. College of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 2. Mining Engineering Postdoctoral Researchers Flow Station, Huainan, Anhui 232001, China)

摘要:采用恒温箱结合黄铜短圆柱试样盒形成恒温边界, 保证在被测试样中形成多维度热流。运用非稳态导热乘积法结合参数估计法对粮食颗粒导热系数、比热容等进行反演计算。同时考虑在恒温箱上开孔影响恒温箱效果, 以及增加试验操作难度, 系统采用 ZigBee 无线数据采集模块实现信号采集与传输。通过对玉米颗粒及稻谷的热物性参数灵敏度分析, 发现比热容灵敏度系数较低, 针对此, 测算系统首先估算出热导率和热扩散率, 再对比热容估计结果进行修正。建立试验测试装置, 对包括皖稻 121 在内的 4 种粮食进行热物性测算, 结果与相关文献吻合, 同时利用皖稻 121 的热物性测算结果, 理论计算和数值仿真监测点温升随时间变化情况, 结果表明, 理论计算温升变化趋势与实测温升较为一致, 进一步验证了参数估计值的准确性与可靠性。

关键词:粮粒; 非稳态导热乘积法; 热物性; 反问题; 随机共轭梯度法

Abstract: Formed constant temperature boundary with constant temperature bath and combined with the brass short cylindrical sample box, the formation of multi-dimensional heat flow is guaranteed in the test sample. The unsteady thermal conductivity multiplication method and parameter estimation method were used to calculate the thermal conductivity and specific heat capacity of grain. At the same time, considering the effect of opening holes on the thermostat, and increasing the difficulty of experimental operation, the ZigBee wireless data acquisition module is used for signal acquisition and transmission. By analyzing the thermophysical parameter sensitivity

analysis of corn and paddy, the sensitivity coefficient of specific heat capacity is found to be low. In view of this, the calculation system first estimated the thermal diffusivity, and then compared the results of heat capacity estimation. An experimental test device was set up to calculate the thermal properties of four kinds of food including “Wandao 121”. The results were consistent with the relevant literature. At the same time, the thermal properties of “Wandao 121”, the theoretical calculation and the numerical simulation were used to monitor the temperature rise over time. The results show that the theoretical trend of temperature rise is consistent with the measured temperature rise, further verifying the value of the parameter estimation accuracy and reliability.

Keywords: grain; unsteady-state heat conduction multiplication-method; thermal properties; inverse problem; random conjugate gradient method

中国是农业和粮食消费大国, 粮食储存对保障国家安全和稳定意义重大, 如何实现粮食的安全储藏一直是研究热点之一^[1-2]。研究^[3]表明冷却干燥通风可以控制粮堆温湿度, 进而实现粮食的长期安全存放, 而粮食作为典型的多孔介质, 干燥通风过程中其内部的传热传质规律较为复杂。导热系数、热扩散率等作为粮食的重要热物性参数, 由于可直接表征粮食传递热量的能力^[4-5], 其准确获取对于指导和优化粮食干燥和安全储藏工艺至关重要。由于多孔介质传热机理较为复杂, 试验测试仍是获取其热物性参数的主要手段^[6]。例如谷和平等^[7]和龚红菊等^[8]分别运用正规状况法及 Dickerson 圆桶瞬态热流法, 对颗粒状堆积物、稻谷的导热系数和热扩散率进行了试验测试。但现有测试方法中, 较少的对试验过程中粮堆内部热量的侧向流动进行考虑, 从而使测试精度受到一定的影响。文献^[9]提出基于非稳态导热乘积法测颗粒状材料热扩散系数, 优点是消除了侧向热流误差带来的影响, 因而更适用于松散物料热物性测试。在此基础

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51574009); 中国博士后科学基金资助项目(编号:2014M561807); 安徽省高校优秀青年人才支持计划重点资助项目(编号: gxyqZD2016087)

作者简介:陈清华(1978—), 男, 安徽理工大学教授, 博士。

E-mail: ahhnds@163.com

收稿日期:2018-03-26

上,岳高伟等^[10]利用高低温交变湿热试验箱设定温度边界(−50~100℃),将应用范围扩展至低温环境。由于非稳态导热乘积法模型只能直接测算热扩散系数 α ,如需获取比热容 C_p 和导热系数 λ ,仍需借助磁力搅拌水卡计^[11]等测试手段,大大限制了其推广适用性。通过易于获取的数据信息结合明确的数学模型,反演或估计被研究对象的多个参数被称为多宗量传热反问题^[12],目前已在多个领域得到应用并被认可。本试验拟基于多维非稳态导热乘积法数学模型,并结合参数估计法^[13-14]对粮食颗粒的导热系数 λ 、比热容 C_p 等进行反演计算,本测试方法试验操作难度较低,便于获取高效准确的粮粒热物性参数,进而为制定粮食储藏技术方案提供科学依据。

1 数学模型

在某一时刻 τ 将一直径为 D ,高为 δ ,上端面绝热,初始温度为 t_0 的短圆柱体,放入温度为 t_w 的恒温环境中。设其温度分布与角度无关,则其导热微分方程见式(1)^[15]。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (0 < \tau, 0 < x < \delta, 0 < r < D), \tag{1}$$

式中:
 T ——温度,℃;
 r ——径向变量,m;
 x ——轴向变量,m;
 α ——热扩散系数,m²/s。

初始条件: $\tau = 0, T = t_0$;边界条件: $x = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0$;
 $x = \delta, T = T_w$ 。

显然该问题为二维非稳态热传导问题,一般采用数值解法,但其步骤复杂且不易编程实现。介于此,试验中引用多维非稳态导热问题的乘积解法^[15]。如图1所示,一短圆柱体由直径为 r 的无限长圆柱和一块厚度为 x 的无限大平板垂直相贯而成,则有:

$$T(R, x, \tau) = [T(x, \tau)] \times [T(r, \tau)]. \tag{2}$$

式(1)的解析解:

$$\theta(r, x, \tau) = [\theta(x, \tau)] \times [\theta(r, \tau)] = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \times \frac{4}{(2n-1)\pi} \times \cos\left[\frac{(2n-1)\pi x}{2L}\right] \times e^{\frac{-(2n-1)^2 \pi^2}{4} F_0} \times \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2J_0(\mu_n \frac{r}{R})}{\mu_n J_1(\mu_n)} \times e^{-\mu_n^2 F_0}\right] \times \theta_0^2. \tag{3}$$

式(3)中包含无穷级数,显然难以直接求解,根据试算取级数前6项即可满足精度要求,式(3)可改写为:

$$\theta(r, x, \tau) = [\theta(x, \tau)] \times [\theta(r, \tau)] = \sum_{n=1}^6 (-1)^{n-1} \times \frac{4}{(2n-1)\pi} \times \cos\left[\frac{(2n-1)\pi x}{2L}\right] \times e^{\frac{-(2n-1)^2 \pi^2}{4} F_0} \times \left[1 - \sum_{n=1}^6 \frac{2J_0(\mu_n \frac{r}{R})}{\mu_n J_1(\mu_n)} \times e^{-\mu_n^2 F_0}\right] \times \theta_0^2, \tag{4}$$

式中:
 $\theta(r, x, \tau)$ ——短圆柱过余温度,℃;

$\theta(x, \tau)$ ——无限大平板过余温度,℃;
 $\theta(r, \tau)$ ——无限长圆柱过余温度,℃;
 θ_0 ——初始过余温度, $\theta = t - t_w$,其中 t 为任意时刻试样温度,℃;
 t_w ——恒温箱内部温度,℃;
 L ——无限大平板厚度,m;
 R ——无限长圆柱半径,m;
 μ_n ——特征值;
 F_0 ——傅里叶数, $F_0 = \alpha \tau / y^2$,其中 α 为热扩散系数(m²/s); y 为特征长度;对于无限大平板 $y = L$,对于无限长圆柱体 $y = R$ 。

根据热扩散率公式 $\alpha = \lambda / (\rho C_p)$,显然如果已知试样密度 ρ 、导热系数 λ 、比热容 C_p 及厚度 δ 等物理参数,可计算得到短圆柱体内任意一点 x 处, τ 时刻的无量纲过余温度 $\theta(r, x, \tau)$,此为传热正问题。

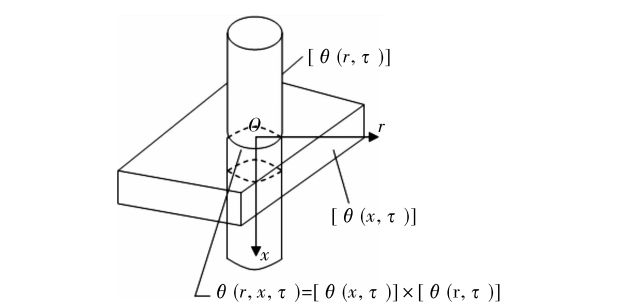


图1 非稳态导热乘积法原理图
Figure 1 Schematic diagram of the unsteady heat conduction product method

2 热物性参数估计灵敏度分析

为研究试样内任意一点处的温度 $Y(\tau, \eta)$ 变化规律,某一时刻 τ 将试样放入温度为 t_w 的环境中,温度扰动记为 $u(\tau)$ 。考虑试样的导热系数 λ 、比热容 C_p 等热物性参数,以及环境温度 t_w 、时间 τ 、空间位置等因素都会影响 $u(\tau)$ 的值,故将这些参数构成一个向量:

$$\boldsymbol{\eta} = (\eta_1, \eta_2, \eta_3, \dots, \eta_m)^T, \tag{5}$$

式中:
 m ——参数个数。

显然,在试验过程中对于一个确定的温度测点,式(5)中未知参数 η_1, η_2 为试样的 λ 和 C_p 。取试样中同一高度处,距中心轴均为 r 的 k 个离散测点处的温度测量值记为 $Y_i(\tau, \eta) (i = 1, \dots, k)$,然后给出一组 λ 和 C_p 的估计值,根据式(4)计算出的过余温度记为 $\theta(\tau, \eta)$,各离散测点 i 的过余温度记为 $\theta_i(\tau, \eta) (i = 1, \dots, k)$,并进行对比:

$$\varepsilon(\eta) = \sum_{i=1}^k [Y_i(\tau, \eta) - \theta_i(\tau, \eta)]^2. \tag{6}$$

由于测量误差以及参数估计具有随机性, $Y_i(\tau, \eta)$ 与 $\theta_i(\tau, \eta)$ 之间必然存在偏差,即 $\varepsilon(\eta) > 0$ 。为此,参数估计的目标是基于式(4)迭代,使偏差 $\varepsilon(\eta) \rightarrow \min$ 。参数向量 $\boldsymbol{\eta}$ 中的 λ 和 C_p 值要能同时以足够的精度估计出来,必须满足在最小二乘估计意义下,在参数估计的时间区间内,参数的灵

敏度线性无关。本试验中灵敏度是指 $\theta(\tau, \eta)$ 对参数 η 的一阶偏导。同时,考虑到方程式的复杂性,直接求偏导数较为困难,采用二阶中心差商进行计算:

$$X_{ij} = [\theta(\tau_i, \eta_1, \dots, \eta_j + \Delta\eta_j, \dots, \eta_m) - \theta(\tau_i, \eta_1, \dots, \eta_j - \Delta\eta_j, \dots, \eta_m)] / (2\Delta\eta_j), \quad (7)$$

式中:
 X_{ij} —— τ_i 时刻 $\theta(\tau, \eta)$ 对参数 η_j 的灵敏度系数。
通常取 $\Delta\eta_j = 0.000\ 1\eta_j$ 。

只有在 λ 和 C_p 线性无关时,2 个参数才能同时估计,因此在估计之前进行灵敏度相关性分析。分别选取玉米和稻谷进行研究。根据参考文献[16]和[17]分别选定玉米的相关参数为:密度 750 kg/m^3 , 导热系 $0.176\ 5\text{ W/(m}\cdot\text{}^\circ\text{C)}$, 比热容 $1\ 500\text{ J/(kg}\cdot\text{}^\circ\text{C)}$, 含水率 17%; 稻谷参数为:密度 $1\ 480\text{ kg/m}^3$, 导热系数 $0.099\ 5\text{ W/(m}\cdot\text{}^\circ\text{C)}$, 比热容 $911.9\text{ J/(kg}\cdot\text{}^\circ\text{C)}$ 。

由图 2、3 可以看出,玉米和稻谷的导热系数和比热容参数灵敏度线性均不相关,但比热容 C_p 灵敏度均非常小(仅为 10^{-3} 数量级),若直接进行参数估计,反演得到的比热容与实际相差较大^[14]。

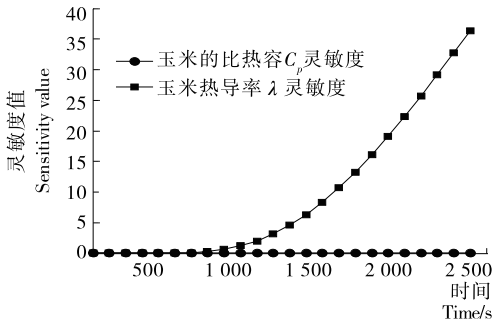


图 2 玉米试样导热系数及比热容灵敏度值
Figure 2 Sensitivity coefficient of the corn sample's thermal conductivity and thermal capacity

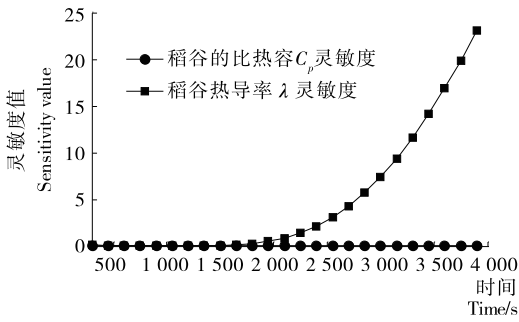


图 3 稻谷试样导热系数及比热容灵敏度值
Figure 3 Sensitivity coefficient of the paddy rice sample's thermal conductivity and thermal capacity

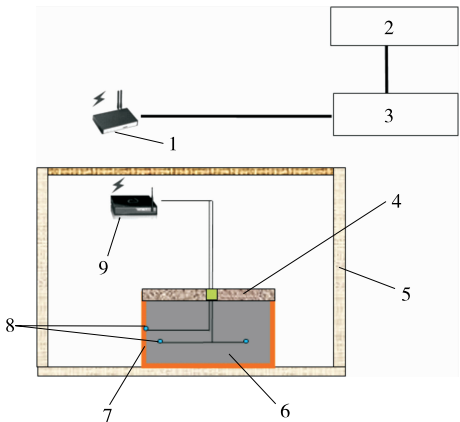
3 关键技术

基于多维非稳态导热乘积法原理,设计测粮食热物性参数的测试系统,需要解决的关键技术有测试系统构建、多维非稳态传热条件、参数估计算法等。

3.1 测试系统设计

如图 4 所示,系统主要由恒温箱、信号采集与传输模块、

信号发射端和接收端、试样筒、温度传感器和微型计算机等构成。为了避免在恒温箱上开孔影响恒温箱效果,以及增加试验操作难度,系统采用深圳蜂汇公司型号为 Z-0004 的 ZigBee 无线数据采集模块实现信号采集与传输。恒温箱温度范围为 $0\sim100\text{ }^\circ\text{C}$, 控温精度 $\pm0.1\text{ }^\circ\text{C}$; 测温热电偶精度 $\pm0.2\text{ }^\circ\text{C}$; ZigBee 数据采集模块的射频芯片 CC2530 的接收灵敏度为 -97 dBm , 有效保证了温度的实时传输。系统软件通过 LabView 编程建立基本松散物体参数输入区、采集温度变化显示区、控制按钮区和计算结果区等,便于对测试结果的观察以及对不同粮食颗粒测算参数设置。



1. 采集信号接收端 2. 微型计算机 3. 信号采集与传输单元 4. 绝热端盖 5. 恒温箱 6. 试样 7. 试样筒体 8. 温度测点 9. 采集信号发射端
图 4 测试装置简图

Figure 4 Diagram of testing system

3.2 非稳态导热乘积物理边界的实现

根据非稳态导热乘积法原理及物理模型要求,试样为圆柱形,同时上表面绝热,下表面和圆柱面为恒温边界。此处利用恒温箱实现恒温环境,并设计圆柱形试样筒盛放试样,为保证试样放入恒温箱后较短时间内与环境温度保持一致,筒体采用黄铜制作,在内壁设置温度测点,待温度与环境温度一样时开始试验测试,以此实现圆柱面和下表面的恒温边界条件。同时,试样筒上端盖为绝热棉制作,形成试样上绝热表面。

3.3 比热容 C_p 灵敏度较低问题的处理

针对试验选用的材料 C_p 灵敏度较低,比热容不可直接估算,采用随机共轭梯度法进行求解^[18],由于式(4)中的 $F_0 = a\tau/y^2$, 只有一个未知数 a , 因此,首先反演估算 a , 然后利用 a 对估计的 C_p 值进行修正,具体流程(见图 5):

- ① 反演估计 a ;
- ② 估计材料 λ 及 C_p 的原始估计值;
- ③ 根据式(4)、(5)、(6)求得满足精度要求的 a 及 λ ;
- ④ 根据 a 估计值对原始估计值 C_p 进行修正,得到最终值 C_p^* 。

为避免在测试过程中,因外界干扰因素造成的个别数据波动对估算结果造成影响,本试验首先计算出每个特定时刻 τ 对应的一组数值 λ 和 C_p^* , 然后对计算出的一系列物性参数求加权平均作为最终参数的估计值。

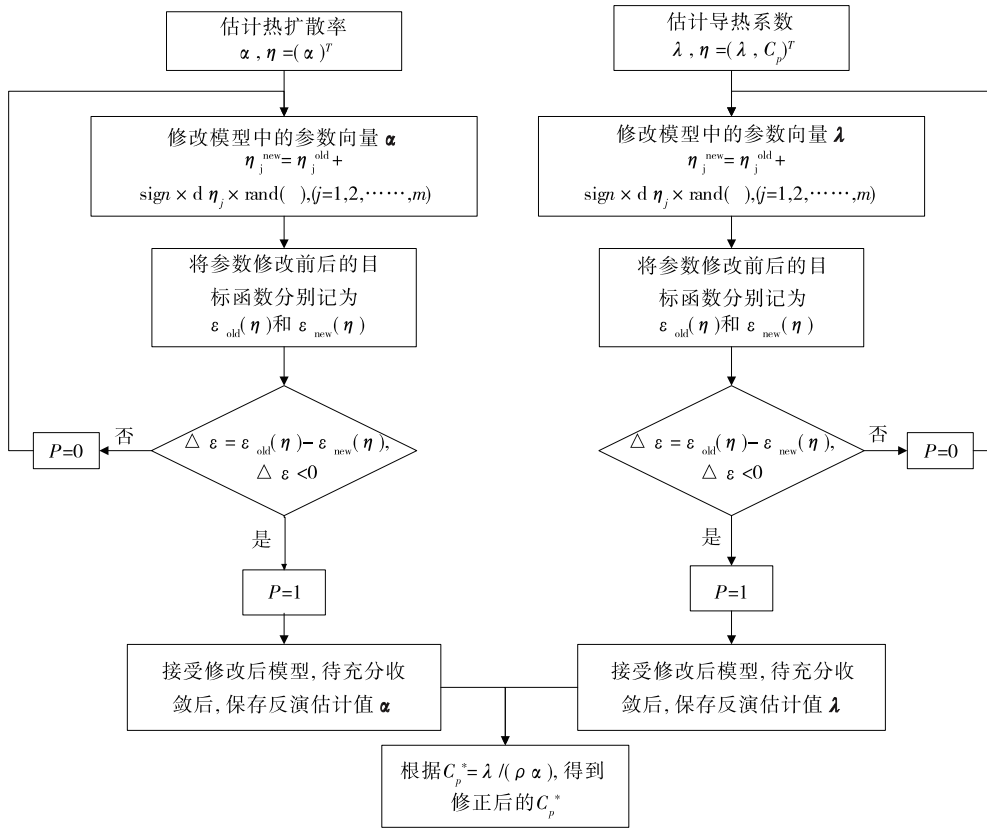


图 5 参数估计流程图

Figure 5 The flow chart of parameter estimation

3.4 温度测试准确性及可靠性

当材料质地均匀,满足各项同性的性质时,温度测点的布置对物性参数测算结果的影响不大。因此,试验前对稻谷颗粒进行筛选,装入箱体时进行压实处理。同时,在离圆柱侧面和底面相同距离的不同位置处,安装多个温度传感器,并取加权平均作为最终测试结果。此外,系统采取无线信号发射与接收的方式,有效保证了试验箱体内部为恒温边界条件,减少外界环境温度对测试结果的影响。

4 热物性测试试验分析

4.1 粮食颗粒热物性参数测试

选取淮南地区含水率为 10.5%的皖稻 121。首先利用孔径为 2 mm 的筛网对稻谷进行筛选,然后装入直径为 400 mm,高为 80 mm 的短圆柱筒试样盒中,填充密度 580 kg/m³,环境温度 20 ℃,恒温箱温度保持 90 ℃。在离试样筒壁面和底面均为 40 mm 的位置处布置 2 个温度测点,取平均值作为最终测试值,依次编号为测点 1 和测点 2。某一时刻 τ 突然将圆柱体试样盒放入恒温箱内,同时观察铜板内壁面温度变化,当铜板内壁温度稳定且趋近于恒温箱体内部温度时,开始采集稻谷内部测点温度。为消除试验初期,测试温度的不稳定对测算结果的影响,选取 100 s 以后的采集数据为分析对象,试验共进行 3 600 s,温度采样间隔 10 s,各测点温度曲线见图 6。

热扩散率 α 初始猜测值为 2.02×10⁻⁷ m²/s,导热系数 λ 和 C_p 初始猜测值分别为 0.099 0 W/(m·℃)和 823 J/(kg·℃),

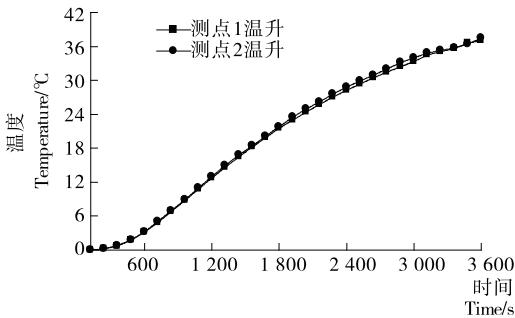


图 6 测点 1、测点 2 的温升曲线

Figure 6 Temperature rise curve of 1# and 2# measuring points

取参数估计结果见表 1。

可以看出热扩散率和导热系数估计结果与文献[17]中的测算结果较为接近,但比热容误差较大(>10%),而修正后的比热容则较为吻合。为进一步验证测算结果准确性,对同一种试样在相同条件下进行多次试验,通过相对偏差 Δη 衡量测算值彼此接近的程度。

$$\Delta \eta = d / \bar{\eta} \times 100\%, \tag{8}$$

式中:

d——单次试验值 η 与 n 次测算值的算术平均 $\bar{\eta}$ 的差值,具体结果见表 2。

由表 2 可以看出,导热系数与热扩散率参数反演结果以及修正后的比热容 C_p^{*} 与对应平均值的最大相对偏差均小于 7%,即试验满足可重复的要求。

表 1 参数估计结果

Table 1 Estimation results of the parameters

来源	导热系数 $\lambda / (\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	比热容 $C_p / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	热扩散系数 $a / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
文献[17]	0.099 5	911.9	1.95×10^{-7}
估计结果	0.098 2	680.0	2.06×10^{-7}
修正结果	—	851.2	—

表 2 参数估计试验可重复精度分析

Table 2 Repeatability accuracy of parameters estimation

来源	$\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	$a / (\times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$C_p^* / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$
第 1 次结果	0.098 2	2.06	851.2
第 2 次结果	0.098 6	1.98	820.0
第 3 次结果	0.099 5	1.92	925.0
平均值	0.098 8	1.99	865.4
最大偏差 $\Delta\eta$	0.71%	3.52%	6.89%

4.2 理论计算与数值仿真结果对比

将表 2 中获取的热物性参数的平均值代入式(4)中,计算 τ 在 100~3 600 s 时的温度理论值,同时在 Fluent 中仿真模拟稻谷内部的温度场变化。数据曲线对比见图 7。

由图 7 可以看出,稻谷的仿真曲线、理论计算曲线与实测温升曲线三者较为吻合,进一步验证了参数估计的准确性。值得注意的是,试验至约 2 600 s 后,实测温升与仿真和理论计算温升开始出现偏差,且随着时间的延长,偏差具有变大趋势。原因可能是热量传递至试验箱上端绝热边界后因无法及时转移,造成热量积聚效应,进而对测点温度产生影响,使实测温升偏大,且随着热量积聚越来越多,影响也就越来越明显。从而为尽量消除此因素的影响,选取 100~2 500 s 时的温升为最终有效测算数据。

4.3 3 种粮食颗粒热物性参数测试分析

为进一步验证测试系统的稳定性与准确性,分别选取材料 Y 两优 900 水稻、联创 11 号和源育 15 玉米作为试样,含水率分别为 13.1%,5.0%,12.5%,填充密度分别为 600,720,800 kg/m³。

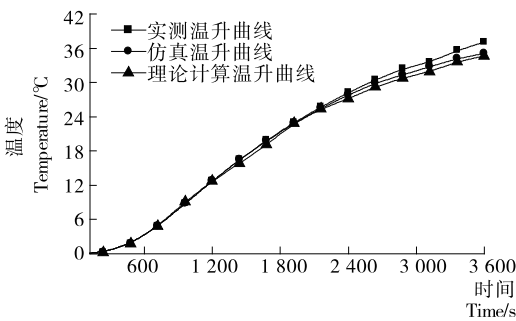


图 7 实测、理论与数值仿真温升曲线对比

Figure 7 Contrast between measurement, theoretical and simulating temperature rise

由表 3 数据可以看出,测得的热导率 λ 与文献[16]和[17]数据较为接近,其中“源育 15”号玉米的导热系数与文献数据相对误差最大,为 4.64%,分析原因可能是不同品种的玉米本身的热物性参数存在差异,且玉米粒与稻谷相比颗粒直径较大,存入试验箱时,玉米颗粒之间的孔隙较大,测温过程温度波动较大,最终导致测算结果与参考值有偏差,但仍小于 5%。符合测试精度要求。

表 3 3 种粮食试样测试结果综合分析

Table 3 Comprehensive analysis of test results of three grain samples

种类	文献热导率 $\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	$\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	$a / (\times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$C_p^* / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$
Y 两优 900	0.101	0.099 1	1.52	1 086
联创 11 号	0.147	0.155 0	1.50	1 435
源育 15	0.154	0.169 0	1.45	1 457

5 结论

(1) 采用恒温箱结合黄铜短圆柱试样盒构建的恒温边界模型便于控制实现,且运用非稳态导热乘积法结合参数估计法对粮食颗粒的热物性参数进行测试在原理与技术上均是可行的。

(2) 采用 ZigBee 无线数据采集方式,数据采集更方便,且不受试验箱体结构的限制,降低了试验操作的难度。

(3) 粮粒的比热容 C_p 的灵敏度系数较小,需先估计再修正,才能得到较为准确的估计值。利用估算的热物性参数值通过理论计算与数值仿真温升变化曲线与实测温度变化曲

(下转第 20 页)

参考文献

[1] 李冬香, 陈清西. 桑葚功能成份及其开发利用研究进展[J]. 中国农学通报, 2009, 25(24): 293-297.

[2] CHAUDHARY A, PECHAN T, WILLETT K L. Differential protein expression of peroxiredoxin I and II by benzo(a)pyrene and quercetin treatment in 22Rv1 and PrEC prostate cell lines[J]. Toxicol Appl Pharmacol, 2007, 220(2): 197-210.

[3] COELHO-DOS-REIS J G, GOMES O A, BORTOLINI D E, et al. Evaluation of the effects of Quercetin and Kaempferol on the surface of MT-2 cells visualized by atomic force microscopy[J]. J Virol Methods, 2011, 174(2): 47-52.

[4] GRAVINA H D, TAFURI N F, SILVA JÚNIOR A, et al. In vitro assessment of the antiviral potential of trans-cinnamic acid, quercetin and morin against equid herpesvirus 1[J]. Res Vet Sci, 2011, 91(3): 158-162.

[5] ZHANG Lin-xia, XU Yang, LI Yu-ting, et al. Protective property of mulberry digest against oxidative stress-A potential approach to ameliorate dietary acrylamide-induced cytotoxicity[J]. Food Chem, 2017, 230: 306-315.

[6] 商敬敏, 牟京霞, 孟庆山, 等. 桑椹酒发酵过程中有机酸含量的变化[J]. 食品工业科技, 2012, 33(4): 241-242, 247.

[7] 沈颖, 刘晓艳, 白卫东, 等. 果酒中有机酸及其对果酒作用的研究[J]. 中国酿造, 2012, 31(2): 29-32.

[8] 黄正勇, 梁贵秋, 黎书明, 等. 桑葚果酒酿造质量控制的研究[J]. 广西蚕业, 2013, 50(2): 53-58.

[9] 杨芳, 王中兴, 王克刚, 等. 星点设计-响应面法优化桑葚果酒发酵工艺[J]. 酿酒科技, 2017(12): 21-26.

[10] 曾霞, 陆燕, 曹建平, 等. 桑葚酒发酵工艺优化及其主要香气成

分分析[J]. 酿酒科技, 2016(1): 120-124.

[11] 涂绍勇, 杨爱华, 梅双喜, 等. 3, 5-二硝基水杨酸法(DNS)测定壳聚糖酶活力的探讨[J]. 食品科技, 2012, 37(1): 240-242, 245.

[12] 童晓滨, 安红纲. 关于强碱弱酸滴定终点与指示剂的选择及滴定顺序[J]. 河西学院学报, 1989(1): 131-137.

[13] 陈娟. 发酵型蜂蜜桑椹酒的酿造技术及品质特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2009.

[14] 杨芳. 富硒桑葚果酒芦丁和槲皮素含量的分析[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(17): 3 842-3 845.

[15] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 四部[M]. 2015 年版. 北京: 中国医药科技出版社, 2015: 89.

[16] 王琳. 桑椹酒酿造工艺的研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2003.

[17] 陈智毅, 陈卫东, 徐玉娟, 等. 离子排斥色谱法测定桑椹原汁有机酸的研究[J]. 食品科学, 2007, 28(3): 296-298.

[18] 刘玮, 金田茜, 康钰莹, 等. 不同产地桑葚酿造的果酒香气成分分析[J]. 食品与发酵科技, 2015, 51(4): 64-68.

[19] 刘玮, 陈亮, 吴志明, 等. 不同酵母发酵的桑葚果酒香气成分的分析[J]. 食品研究与开发, 2013, 34(24): 212-217.

[20] 吴琼, 冯卫敏, 蒋和体. 不同杀菌方式对桑葚原汁品质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(9): 144-149.

[21] 李贺贺, 胡萧梅, 李安军, 等. 采用顶空固相微萃取和搅拌棒吸附萃取技术分析古井贡酒中香气成分[J]. 食品科学, 2017, 38(4): 155-164.

[22] 周庆云, 范文来, 徐岩. 景芝芝麻香型白酒重要挥发性香气成分研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(16): 62-67.

(上接第 14 页)

线一致,进一步说明了参数估计的准确性;对包括皖稻 121 在内的 4 种粮食进行热物性测算,结果与相关文献吻合,能够满足实际应用要求。

参考文献

[1] 张德欣, 杨庆询, 刘艳芳. 黄淮流域高水分玉米就仓干燥技术优化研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(3): 134-138, 144.

[2] 施灿璨, 周福君, 夏吉庆, 等. 自然冷资源低温储藏仓设计与稻谷储藏试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 375-382.

[3] 尹君, 吴子丹, 张忠杰, 等. 不同仓型的粮堆温度场重现及对比分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 281-287.

[4] KIBAR Hakan. Determining the functional characteristics of wheat and corn grains depending on storage time and temperature [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2016(4): 749-759.

[5] AERLICHMAN V N, FATYCHOV J A, KUKELKA L, et al. Thermal conductivity of food products [J]. Acta Agrophysica, 2014(11): 61-64.

[6] 于帆, 张欣欣, 何小瓦. 材料热物理性能非稳态测量方法综述[J]. 宇航计测技术, 2006(4): 23-30.

[7] 谷和平, 肖人卓. 颗粒状物料热物性的快速测定[J]. 南京工业大学学报: 自科版, 1994, 16(4): 24-29.

[8] 龚红菊, 孙远见. 稻谷的导热系数测定方法研究[J]. 云南农业大

学学报, 2006(3): 383-386.

[9] 秦汝祥, 张国枢, 陈清华, 等. 基于非稳态导热乘积法的松散煤体导热系数测温系统的设计[J]. 工矿自动化, 2008(5): 9-13.

[10] 岳高伟, 李豪君, 王兆丰, 等. 松散煤体导热系数的温度及粒度效应[J]. 中国安全生产科学技术, 2015(2): 17-22.

[11] 肖建庄, 王平, 朱伯龙. 我国钢筋混凝土材料抗火性能研究回顾与分析[J]. 建筑材料学报, 2003, 6(2): 182-189.

[12] 杨海天, 胡国俊. 基于二阶敏度的共轭梯度法求解多宗量稳态传热反问题[J]. 应用基础与工程科学学报, 2002, 21(2): 20-26.

[13] HONG Jiang, PAUL Wilford. A stochastic conjugate gradient method for the approximation of functions [J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2012(9): 2 529-2 544.

[14] 乐凯, 张欣欣, 于帆. 基于三点法的柱状生物组织热特性参数估计[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(5): 838-840.

[15] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 133-140.

[16] 程龙, 曹阳, 李光涛, 等. 圆球导热法测定粮食导热系数研究[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(10): 89-93.

[17] 龚红菊. 稻谷物性参数的实验测定[D]. 南京: 南京农业大学, 2004: 55-56.

[18] 朱培民, 王家映. 共轭梯度法[J]. 工程地球物理学报, 2008, 5(4): 381-386.