

基于伴随方程法的鱼饲料热特性参数反演

陈计远¹, 王粮局¹, 王红英^{1*}, 张国栋², 王 威¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中粮粮谷控股有限公司, 北京 100020)

摘 要: 比热、导热率和导温系数是鱼饲料重要的热特性参数, 其在干燥及冷却工艺参数的调整、饲料湿热传递仿真模拟研究中均有应用。为了探究鱼饲料的热特性, 同时探究反演算法求解饲料热特性的适应性, 该研究以草鱼(成鱼)膨化饲料为研究对象, 建立基于伴随方程法的反演模型; 利用自行搭建的热传导试验装置并配合红外热像仪(测温精度 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$), 以获得饲料试样的温度分布规律; 利用此数据可反演计算含水率为 11%~17% 的饲料在 20~80 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的比热、导热率和导温系数。使用差式扫描量热仪(Differential Scanning Calorimetry, DSC)和热特性分析仪分别测量饲料的比热和导热率, 并计算导温系数, 将此作为实测值; 将反演算法所得值作为计算值。对二者进行线性拟合, 决定系数 R^2 均大于等于 0.980, 说明比热和导热率的计算值与实测值的误差较小, 结果表明基于反演算法的鱼膨化饲料热特性参数测定方法是可行的。同时, 结果表明, 草鱼膨化饲料在 11%~17% 含水率和 20~80 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的比热为 1.710~1.840 $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。饲料比热随温度的增大而显著增大 ($P<0.05$)。当含水率由 11% 增大至 17% 时, 饲料的比热显著增加 ($P<0.05$), 且呈线性规律。饲料的导热率为 0.086~0.148 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 当温度由 20 $^{\circ}\text{C}$ 增大至 80 $^{\circ}\text{C}$ 时, 草鱼膨化饲料导热率显著增大 ($P<0.05$); 含水率对其影响同样显著 ($P<0.05$)。饲料的导温系数为 5.701~10.003 m^2/s , 且受温度和含水率的影响均显著 ($P<0.05$)。研究可为鱼饲料热特性参数的测定提供一种新思路。

关键词: 反演; 比热; 导热率; 导温系数; 鱼饲料

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.19.037

中图分类号: S816.8

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-19-0316-07

陈计远, 王粮局, 王红英, 等. 基于伴随方程法的鱼饲料热特性参数反演[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 316-322.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.19.037 <http://www.tcsae.org>

Chen Jiyuan, Wang Liangju, Wang Hongying, et al. Inversion of the thermal property parameters of fish feed based on adjoint equation method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(19): 316-322. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.19.037 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

中国是水产养殖业大国, 同时也是最大的水产饲料生产国^[1]。在水产饲料加工过程中, 涉及诸多湿热处理工序, 如干燥和冷却等。在实际生产中, 对上述湿热处理工序进行工艺参数调整时, 需要参考饲料的热特性参数值并辅以人工经验^[2], 但生产者大多难以查找到相应的数值。另外, 国内外有大量针对上述湿热处理过程的仿真模拟研究, 而仿真结果的准确性极其依赖热特性参数的设定, 但部分研究在选取热特性参数时大多参考果蔬和谷物等, 而未能设定较准确的数值, 最终导致仿真结果误差较大。因此准确获得水产饲料热特性参数值尤为重要。

在水产饲料众多的热特性参数中, 比热、导热率和导温系数是最为重要且应用最为广泛的^[3]。孔丹丹等^[4]利用差式扫描量热仪(Differential Scanning Calorimetry, DSC)测量了仔猪饲料在 10%~18% 含水率下的比热, 此方法需要将饲料颗粒粉碎后测试, 破坏了饲料颗粒的多

孔介质特性, 可能会影响所测数据的准确性^[5]; 另外, DSC 设备由于高昂的价格和维护使用成本, 一般较难获取。宗力等^[6]利用红外灯和杜瓦瓶等装置自行搭建试验台以测定鱼颗粒饲料在 4.0%~10.7% 含水率下的导热率, 由于试验装置零部件众多且复杂, 试验结果偏差较大, 需要进行大量重复试验进行误差修正。综上, 采用上述试验方法测定比热、导热率和导温系数, 可能会面临试样微观结构遭到破坏、试验装置复杂、误差较大等问题。而基于反演算法的数值计算方法可为饲料热特性参数的测定提供一种新思路。

在传热学中, 热传导正问题通常指已知试样的热特性参数值, 计算其温度场的分布规律; 而反问题则与之相反, 求解反问题的过程即为反演计算^[7]。Peeketi 等^[8]提出了一种针对流化状态物料导热率的反演算法, 并引入孔道网络模型以提高算法的精确度。李望铭等^[9]利用反演算法求解了含水率为 38%~44% 的小麦面团在 -30~30 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的导热率。周宇等^[10]基于伴随方程法提出了一种针对飞行器外壳材料, 可同时求解比热和导热率的反演算法, 这为本研究提供了基础。现有研究极少将反演算法用于求解水产饲料热特性参数中。

本研究以饲喂量较大的草鱼(成鱼)膨化饲料为研究对象, 首先推导热传导正问题的数学模型, 然后利用伴随方程法进行反问题的求解, 即反演算法的提出。利用自行搭建的热传导试验装置并配合红外热像仪, 以获

收稿日期: 2021-06-30 修订日期: 2021-08-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0500600)

作者简介: 陈计远, 博士生, 研究方向为饲料加工工艺与装备。

Email: chenjiyuan23@163.com

*通信作者: 王红英, 教授, 博士生导师, 研究方向为饲料加工工艺与装备。

Email: hongyingw@cau.edu.cn

中国农业工程学会会员: 王红英(E041200500S)

得饲料的温度分布规律; 利用此数据可反演得到含水率为 11%~17% 的饲料在 20~80 °C 温度范围内的比热、导热率和导温系数。同时使用 DSC 和热特性分析仪获得饲料热特性参数的实测值, 与上述计算值进行比较, 以验证反演算法的准确性。以期鱼饲料热特性参数的测定提供一种新思路。

1 材料与方法

1.1 试验材料

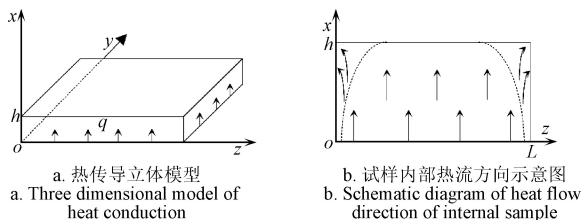
本试验所用饲料为草鱼膨化饲料, 取自武汉通威饲料厂。饲料初始湿基含水率为 10.01%; 形状近似为圆柱体, 其直径为(5.13±2.35) mm, 长度为(4.0±1.29) mm; 其容重为 701 kg/m³。将饲料置于恒温恒湿箱中 3~6 h, 使其充分吸湿后装入密封袋中, 并在 4 °C 的冷藏柜中静置 1 周, 以获得湿基含水率为 11%、14% 和 17% 的饲料试样^[11]。上述水平设置基本符合草鱼膨化饲料在干燥末期、冷却和仓储过程中的含水率范围^[2]。

1.2 试验仪器

AL204 分析天平, 梅特勒托利多仪器有限公司; HH-S 数显恒温油浴锅, 常州国华电器有限公司; KD2 Pro 热特性分析仪, 美国 Decagon 公司; DSC-60 差式扫描量热仪, 日本岛津公司; CTHI-150B 恒温恒湿箱, 上海施都凯仪器设备有限公司; DHG-9240A 电热恒温鼓风干燥箱, 上海精宏实验设备有限公司; TI55FT 红外热像仪, 上海 Fluke 测试仪器有限公司。

1.3 热传导模型及反演算法

如图 1a, 饲料试样的热传导试验属于半无限大物体一维非稳态导热模型, 即仅在 1 个坐标方向上存在温度梯度, 且传热也仅在此坐标方向上进行。具体地, 给定图 1 所示的有限厚度为 h 的平板状饲料试样, 其初始时刻的内部温度均匀分布, 为 T_0 ; $t=0$ 时, 在 $x=0$ 的边界即 yo 平面 (加热面) 上施加恒定热流 q , 并记录此处试样温度随时间变化的响应曲线; 热流 q 沿 y 与 z 方向均未发生热交换, q 仅沿 x 方向传导; 同时记录 $x=h$ 处 (测试面) 温度随时间变化的响应曲线。特别地, 图 1b 是饲料试样内部热流方向示意图, 其各侧面的热交换无法避免, 靠近侧面的热流 q 会发生“弯折”。但在实际工程中, 若试样的长与宽 L 超过其厚度 h 的 8~10 倍, 则认为中心区域远离侧面的热干扰, 因此仍可将饲料试样的热传导试验视为一维导热。



注: 箭头表示热流方向; h 为试样厚度, mm; q 为恒定热流, W·m⁻²; L 为试样长度或宽度, mm。

Note: The arrow is the direction of heat flow; h is the thickness of the sample, mm; q is the constant heat flow, W·m⁻²; and L is the length or width of the sample, mm.

图 1 热传导模型原理图

Fig.1 Schematic of heat conduction model

正问题数学模型的建立是反问题求解的基础。上述正问题可表示为

$$c(x,t) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k(x,t) \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (1)$$

式中 c 为饲料的比热, kJ/(kg·°C); x 为距加热面的距离, mm; t 为热传导试验进行的时间, s; T 为饲料试样温度, °C; k 为导热率, W/(m·K)。

边界条件为

$$-k(x,t) \frac{\partial T}{\partial x} = q$$

式中 q 为均匀热流, W/m²。

初始条件为 $T=20$ °C, $t=0$ s。

针对上述正问题, 采用周宇等^[10]提出的伴随方程法反演逆问题, 以同时求解饲料的比热和导热率。则该逆问题等价于求解合适的 $c(x,t)$ 和 $k(x,t)$, 使如下目标函数达到极小的优化问题

$$J(k,c) = \sum_{i=1}^N \int_{t=0}^t [T(x_i,t,k,c) - \tilde{T}(x_i,t)]^2 dt \quad (2)$$

式中 \tilde{T} 为饲料试样温度的测量值, °C; J 为目标函数; x_i 为第 i 个测试面与加热面的距离, mm。

采用格朗日乘法将上述目标函数转化为如下伴随方程

$$\begin{aligned} J = & \int_0^t \left[(T_{x=0} - \tilde{T}_{x=0})^2 + (T_{x=h} - \tilde{T}_{x=h})^2 \right] dt \\ & + \iint (T - \tilde{T})^2 \delta(x - x_i) dx dt \\ & + \iint \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(k(x,t) \frac{\partial T}{\partial x} \right) - c(x,t) \frac{\partial T}{\partial t} \right) \lambda(x,t) dx dt \end{aligned} \quad (3)$$

式中 λ 为伴随变量。

从而, 目标函数对 $c(x,t)$ 和 $k(x,t)$ 的偏导数分别为

$$\frac{\partial J}{\partial k} = -\frac{\partial \lambda}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x}, \quad \frac{\partial J}{\partial c} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

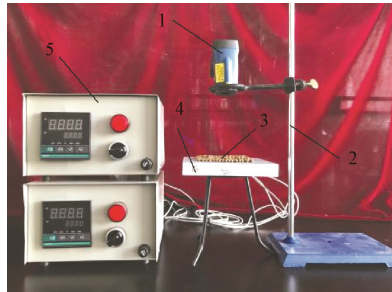
最后, 由 $x=0$ 及 $x=h$ 的 T - t 数据, 利用 MATLAB 软件计算时, 先求解伴随方程 (3) 得到伴随变量后, 然后带入式 (4) 求得梯度值, 最后由式 (2) 解得 c 和 k 。

1.4 热传导试验装置

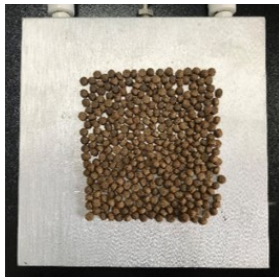
传热试验装置可分为稳态法与瞬态法。其中, 稳态法需要较长的稳定加热时间, 无法适应于含有一定水分的物料; 而瞬态法则可以弥补上述方法的不足^[7]。故根据瞬态法原理设计图 2a 所示的传热试验装置。图 2b 为饲料试样, 为近似呈 90 mm×90 mm 的矩形, 其中底面称为加热面, 上表面称为测试面。饲料单层紧密排布, 共约 10 g, 厚度即为饲料颗粒长度, 约 4 mm。

开启智能控温仪并设定加热温度 80 °C, 铸铝均热板 (150 mm×150 mm) 开始加热升温, 智能控温仪实时监测铸铝均热板温度以实现温度的精准控制; 待实时温度达到设定的加热温度, 将饲料快速平铺到铸铝均热板上, 并开始计时; 紧贴均热板的饲料试样首先开始升温, 并逐渐向远离均热板的方向延伸, 最终将热量传导至饲料试样的测试面; 在 0~10 s 内, 每间隔 1 s 使用红外测热

像仪(精度 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$)拍摄饲料层测试面和铸铝均热板上表面的红外热像图,其中红外热像仪固定在支架上,避免成像距离差异干扰热成像;利用 SmartView 软件处理红外热像图以得到饲料试样测试面($x=h$)和加热面($x=0$)的温度-时间数据,其中 $x=0$ 处的温度近似为铸铝均热板上表面的温度。由此获得的 $T_{(x=0)}-t$ 和 $T_{(x=h)}-t$ 可用于 1.3 节的反演计算。



a. 热传导试验装置实物图
a. Physical drawing of heat conduction test device



b. 热传导试验中的饲料试样
b. Feed sample in heat conduction test

1. 红外热像仪 2. 支架 3. 饲料试样 4. 均热板 5. 控温仪
1. Infrared thermal imager 2. Bracket 3. Feed sample 4. Heating plate 5. Temperature controller

图 2 热传导试验装置及饲料试样

Fig.2 Heat conduction test device and feed sample

1.5 热特性参数的测定

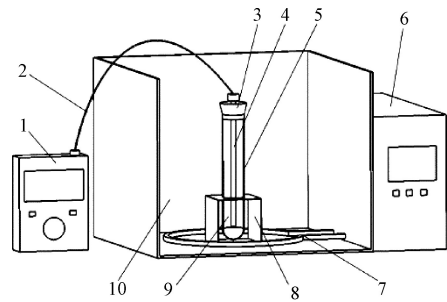
使用 DSC 和热特性分析仪测得饲料的比热和导热率作为参考值,与通过反演算法计算得到的数值进行对比,以检验算法的准确性^[7],以含水率为 17% 的饲料数据作验证。使用 DSC 测定饲料在 20~80 $^{\circ}\text{C}$ 范围内的比热,干燥过程中的热风温度和冷却过程中的空气温度多在此范围内。试验前需要将饲料颗粒粉碎并全部通过 40 目筛网,装入坩埚并加盖密封,具体测试程序与陈计远等^[11]一致。每个样品进行 3 次重复试验,取平均值作为最终结果。

饲料导热率的测定装置见图 3。试验时同样粉碎后过 40 目筛网,将粉碎后的饲料粉料装满试管并压实;将探针居中插入饲料试样中,保证试样完全覆盖探针,并加盖塞子,避免空气及水分散失对数据的影响;开启油浴锅,当二甲基硅油温度达到设定值后,记录热特性分析仪显示的数值。

导热系数使用公式(5)计算得到

$$\alpha = \frac{k}{\rho_b c} \quad (5)$$

式中 α 为导热系数, m^2/s ; ρ_b 为容重, kg/m^3 。



1. 热特性分析仪 2. 连接线 3. 塞子 4. 探针 5. 试管 6. 油浴锅 7. 加热丝
8. 支架 9. 饲料 10. 二甲基硅油
1. Thermal characteristic analyzer 2. Connecting line 3. Plug 4. Probe 5. Test tube
6. Oil bath 7. Heater 8. Bracket 9. Feed 10. Dimethyl silicone oil

图 3 导热率测定装置

Fig.3 Test device of thermal conductivity

2 结果与分析

2.1 反演算法的验证

图 4 是含水率为 17% 的饲料在热传导试验过程中的温度变化规律。在初始时,加热面与测试面的温度梯度较大;随着传热时间的增加,温度梯度逐渐减小,而且出现了边角效应。这是因为外围饲料颗粒与空气的接触面积更大^[12],对流传热不可避免,但饲料试样中心区域与边角处的温度并无显著差异($P>0.01$),这保证了试验中试样热量分布的均匀性,避免热量分布差异对热传导数据准确性的影响。以上均与 1.3 节中的分析相符。

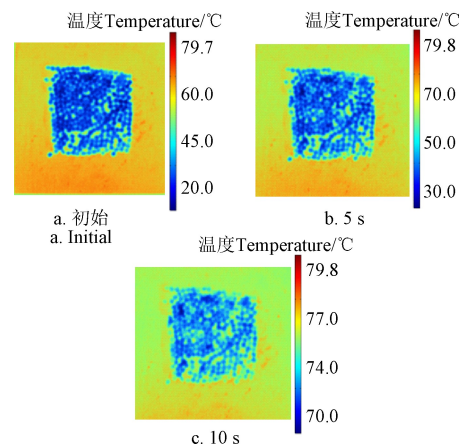


图 4 不同传热时间的饲料(17%含水率)红外热像图
Fig.4 Infrared thermographs of feed (moisture content is 17%) at different heating time

王红英等^[13]指出玉米和小麦等饲料原料的热特性受含水率的显著影响,陈计远等^[11]针对 9 种鱼饲料的热特性参数研究中,同样得到了上述结论。因此在热传导试验中,饲料试样的含水率是否变化对于反演计算结果的准确性至关重要。表 1 是 3 个含水率水平的饲料试样在不同传热时间下的实测含水率值。结果表明,含水率为 11%~17% 的草鱼膨化饲料在 80 $^{\circ}\text{C}$ 下加热 10 s,含水率无显著差异($P>0.01$),这保证了在各组试验中试样的一致性。综上,1.4 节中针对热传导模型及反演算法而设计的试验装置是可行的。另外,在前期进行的预试验中,若饲料试样的含水率大于 17% 或温度大于 80 $^{\circ}\text{C}$,则饲料

试样含水率会有部分损失,这是 1.1 节中含水率水平仅在热风干燥末期的主要原因。

表 1 不同传热时间的饲料含水率
Table 1 Moisture content of feed at different heating time %

传热时间 Heating time/s	含水率水平 Moisture content level/%		
	11	14	17
0	11.01±0.26 ^a	13.98±0.13 ^a	17.00±0.35 ^a
5	10.98±0.10 ^a	13.98±0.28 ^a	17.00±0.10 ^a
10	10.98±0.41 ^a	13.97±0.01 ^a	16.97±0.14 ^a

注：结果表示为平均数±标准差，同列不同字母表示差异显著（ $P<0.01$ ）。
Note: Results expressed as means ± standard deviation, different letters in the same column are significantly different ($P<0.01$).

按照 1.5 节中的方法测量饲料的比热、导热率和导热系数，将此作为实测值；将反演计算所得值作为计算值。以含水率为 17% 的饲料为例，其在 20~80℃ 温度范围下的比热及导热率的实测值及计算值拟合情况见图 5。拟合方程的决定系数 R^2 越大，则计算值越接近实测值^[4,14]。由图 5a 和 5b 得， R^2 均大于等于 0.980，说明比热和导热率的计算值与实测值的误差较小。因此，基于反演算法的鱼膨化饲料热特性参数测定方法是可行的。

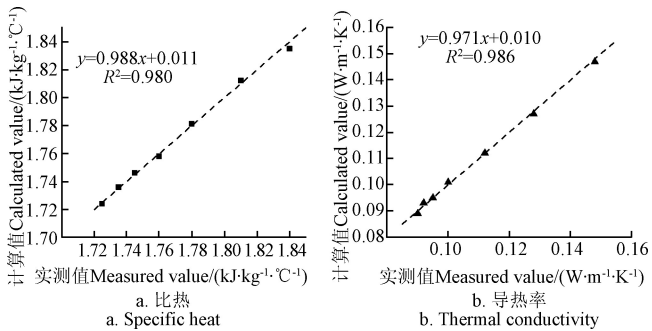


图 5 热特性参数计算值与实测值的对比

Fig.5 Comparison between calculated and measured values of thermal characteristic parameters

同时，以生长猪颗粒饲料和鲮鱼（成鱼）膨化饲料为对象，验证此算法对其他种类饲料的适应性，见表 2。决定系数 R^2 均大于等于 0.976，说明基于反演算法的热特性参数测定方法同样可应用于其他种类的水产饲料和畜禽饲料。

表 2 2 种饲料热特性参数计算值与实测值的对比
Table 2 Comparison between calculated and measured values of thermal characteristic parameters of two kinds of feed

饲料种类 Feed type	比热 Specific heat		导热率 Thermal conductivity	
	回归模型 Regression model	决定系数 Coefficient of determination R^2	回归模型 Regression model	决定系数 Coefficient of determination R^2
生长猪料 Growing pigs feed	$y=0.980x+0.002$	0.980	$y=0.9780x+0.011$	0.977
鲮鱼料 Channel fish feed	$y=0.9871x+0.016$	0.979	$y=0.979x+0.015$	0.976

注：y 为计算值，x 为实测值。
Note: y is calculated value, x is measured value.

2.2 温度及含水率对鱼饲料比热的影响

草鱼膨化饲料的比热随温度及含水率变化规律如

图 6 所示，其在 11%~17% 含水率和 20~80℃ 温度范围内的比热为 1.710~1.840 kJ/(kg·℃)。与陈计远等^[11]针对草鱼、团头鲂等草食性鱼用饲料比热研究中的结果相符；略高于王红英等^[15]所测乳猪饲料的比热值。可能的原因是水产饲料相较于畜禽饲料具有更高的粗蛋白含量，而 Pongpichaiudom 等^[16]指出比热会随着蛋白质含量的增加而增大。

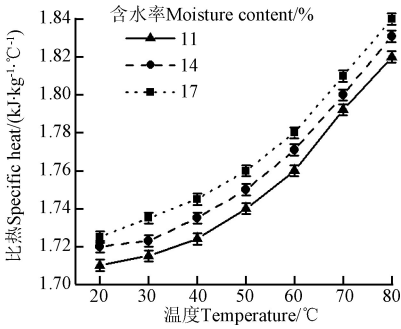


图 6 饲料比热随温度及含水率的变化
Fig.6 Variation of specific heat of feed with temperature and moisture content

当温度由 20℃ 增大至 80℃ 时，饲料比热显著增大（ $P<0.05$ ）。产生此规律的原因可能是温度升高使得物体分子的热运动增强，同时饲料颗粒内部空隙中空气的导热作用也随之增强，最终使饲料比热增大^[17-18]。另外，孔丹丹等^[19]的研究表明，在 25~100℃ 温度范围内，甜菜渣和鱼粉的比热与温度呈二次曲线关系；陈计远等^[11]同样指出，在 20~120℃ 温度范围和 20%~26% 含水率范围内，部分草食性鱼用饲料的比热与温度呈二次曲线关系。本研究与上述研究相同。当含水率由 11% 增大至 17% 时，饲料的比热显著增加（ $P<0.05$ ），且呈线性规律。这可能是因为水的比热约为 4.20 kJ/(kg·℃)，而饲料的比热一般为 1.2~2.7 kJ/(kg·℃)，因此，含水率的增加极易导致饲料比热的增加^[20-21]。陈计远等^[11]发现肉食性鱼用饲料在 20%~26% 含水率范围内同样具有上述规律。杨洲等^[22]的研究表明稻谷的比热与含水率同样呈线性正相关。上述研究结论均与本研究一致。

2.3 温度及含水率对鱼饲料导热率的影响

图 7 为饲料导热率随温度及含水率的变化。当温度由 20℃ 增大至 80℃ 时，导热率显著增大（ $P<0.05$ ）。这是因为饲料中的离子和偶极子在高温下会表现出较活跃的晶格振动，从而加快传热速度^[23]。彭飞等^[17]对豆粕在 25~125℃ 温度范围内的导热率研究中同样得出了上述规律。特别地，在 50~80℃ 温度范围内，导热率急剧增大。在高温下饲料内部发生了非酶褐变反应^[19]，导致黏度增大，孔隙率降低，这可能是造成上述现象的原因。孔丹丹等^[19]在针对玉米、小麦、大麦和高粱的导热率研究中也发现了类似的现象。

另外，本研究中所测饲料导热率为 0.086~0.148 W/(m·K)，大于仔猪饲料^[19]和生长育肥猪饲料^[6]在相同温度和含水率范围下的导热率。在饲料生产中，要求畜禽饲料原料粉碎后全部通过 8 目筛网，16 目筛上物

不超过 20%; 而水产饲料原料全部通过 40 目筛网, 60 目筛上物不超过 10%^[24]。因此水产饲料原料的粉碎粒度更小, 粉体颗粒孔隙率更低, 结构更加紧实。Shrestha 等^[5]研究表明, 物料孔隙率低, 则传热效果越好, 导热率越大。这可能是导致草鱼饲料导热率大于猪饲料导热率的原因。

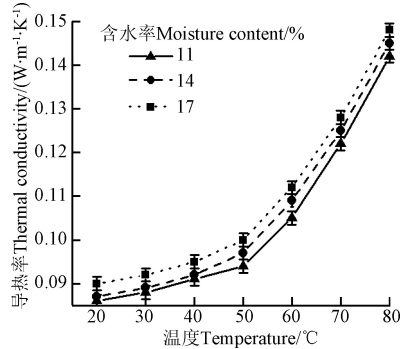


图 7 饲料导热率随温度及含水率的变化

Fig.7 Variation of thermal conductivity of feed with temperature and moisture content

2.4 温度及含水率对鱼饲料导温系数的影响

如图 8, 饲料在含水率 11%~17%、温度 20~80 °C 下的导温系数为 5.701~10.003 m²/s, 且受温度和含水率的影响均显著 ($P<0.05$)。本研究中, 导温系数由式 (5) 计算得到, 其反映了饲料的导热能力与储热能力之间的比值关系^[19], 因此可得导致其变化规律的原因。由 2.2 节及 2.3 节分析可得, 导热率随温度的增加速率大于比热的增加速率, 这是造成导温系数产生上述变化的主要原因。Elansari 等^[25]和 Raigar 等^[26]的研究同样阐明了上述原因。

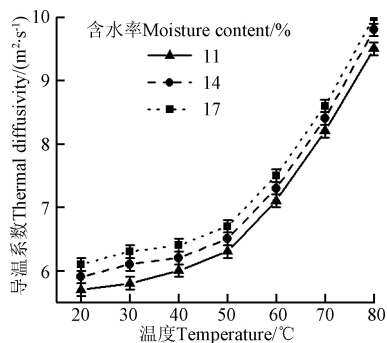


图 8 饲料导温系数随温度及含水率的变化

Fig.8 Variation of thermal diffusivity of feed with temperature and moisture content

3 结 论

1) 基于伴随方程法的反演模型并结合热传导试验, 可反演计算含水率为 11%~17% 的草鱼 (成鱼) 膨化饲料在 20~80 °C 温度范围内的比热、导热率和导温系数。此反演值与实测值拟合效果较好, 决定系数 R^2 均大于等于 0.980。

2) 当温度由 20 °C 增大至 80 °C 时, 草鱼 (成鱼) 膨化饲料比热显著增大 ($P<0.05$)。当含水率由 11% 增

大至 17% 时, 饲料的比热显著增加 ($P<0.05$), 且呈线性规律。

3) 当温度由 20 °C 增大至 80 °C 时, 草鱼 (成鱼) 膨化饲料导热率显著增大 ($P<0.05$)。含水率对其影响同样显著 ($P<0.05$)。

4) 草鱼 (成鱼) 膨化饲料在含水率 11%~17%、温度 20~80 °C 下的导温系数为 5.701~10.003 m²/s, 且受温度和含水率的影响均显著 ($P<0.05$)。

[参 考 文 献]

- [1] 刘子飞. 中国渔业经济改革逻辑、成效与方向[J]. 世界农业, 2019, 8(1): 41-48.
- [2] 曹康, 郝波. 中国现代饲料工程学[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2014: 56-88.
- [3] 潘永康, 王喜忠, 刘相东. 现代干燥技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 106-187.
- [4] 孔丹丹, 陈啸, 杨洁, 等. 仔猪配合料比热预测模型的构建[J]. 农业工程学报, 2016, 32(18): 307-314.
Kong Dandan, Chen Xiao, Yang Jie, et al. Establishment of specific heat prediction model for weaned piglet mash feed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(18): 307-314. (in Chinese with English abstract)
- [5] Shrestha B L, Baik O D. Thermal conductivity, specific heat, and thermal diffusivity of saponaria vaccaria seed particles[J]. Transactions of the ASABE, 2010, 53(5): 1717-1725.
- [6] 宗力, 彭小飞. 混合法测定颗粒饲料比热的初步研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 201-204.
Zong Li, Peng Xiaofei. Determining heat capacity of pellet feed by mixing technique[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(3): 201-204. (in Chinese with English abstract)
- [7] 邵俊华, 李文喜, 张欢, 等. 基于二阶振荡粒子群算法的铝合金 Y-U 硬化模型参数反演[J]. 塑料工程学报, 2021, 28(7): 193-198.
Shao Junhua, Li Wenxi, Zhang Huan, et al. Y-U hardening model parameters inversion of aluminum alloy based on second-order oscillatory particle swarm optimization[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28(7): 193-198. (in Chinese with English abstract)
- [8] Peeketi A R, Moscardini M, Papeschi S, et al. Analytical estimation of the effective thermal conductivity of a granular bed in a stagnant gas including the Smoluchowski effect[J]. Granular Matter, 2019, 21(4): 287-290.
- [9] 李望铭, 赵学伟, 张艳艳, 等. 反演法求小麦面团在冻结温度范围内的热导率[J]. 食品工业科技, 2020, 41(1): 1-5.
Li Wangming, Zhao Xuewei, Zhang Yanyan, et al. Thermal conductivity of wheat dough determined by an inversion method within freezing temperature[J]. Science and

- Technology of Food Industry, 2020, 41(1): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [10] 周宇, 钱炜祺, 何开锋, 等. 同时反演材料热传导系数和比热的算法[J]. 计算物理, 2011, 28(5): 719-724.
- Zhou Yu, Qian Weiqi, He Kaifeng, et al. Estimating temperature-dependent thermal conductivity and specific heat simultaneously[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2011, 28(5): 719-724. (in Chinese with English abstract)
- [11] 陈计远, 王红英, 金楠, 等. 基于营养组成的鱼饲料比热预测模型[J]. 农业工程学报, 2020, 36(11): 296-302.
- Chen Jiyuan, Wang Hongying, Jin Nan, et al. Specific heat prediction model based on nutritional composition for fish feed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(11): 296-302. (in Chinese with English abstract)
- [12] 张鹏飞, 吴鹏鹏, 张琦, 等. 带式烘干机中水产饲料料层厚度对其表面风速场分布的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7): 288-294.
- Zhang Pengfei, Wu Pengpeng, Zhang Qi, et al. Effects of aquatic feed layer thickness on distribution of airflow velocity on feed layer surface in belt dryer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(7): 288-294. (in Chinese with English abstract)
- [13] 王红英, 李倪薇, 高蕊, 等. 不同前处理对饲料玉米比热的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 269-276.
- Wang Hongying, Li Niwei, Gao Rui, et al. Effects of different pretreatments on specific heat of forage maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(14): 269-276. (in Chinese with English abstract)
- [14] 渠琛玲, 汪紫薇, 王雪珂, 等. 基于低场核磁共振的热风干燥过程花生仁含水率预测模型[J]. 农业工程学报, 2019, 35(12): 290-296.
- Qu Chenling, Wang Ziwei, Wang Xueke, et al. Prediction model of moisture in peanut kernel during hot air drying based on LF-NMR technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(12): 290-296. (in Chinese with English abstract)
- [15] 王红英, 高蕊, 李军国, 等. 不同原料组分的配合饲料比热模型[J]. 农业工程学报, 2013, 29(9): 285-292.
- Wang Hongying, Gao Rui, Li Junguo, et al. Model of formula feed specific heat based on different components of feed ingredients[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(9): 285-292. (in Chinese with English abstract)
- [16] Pongpichaiudom A, Songsermpong S, Tang J M, et al. Modeling of dielectric and thermal properties of protein-enriched instant noodles as a function of food chemical composition[J]. International Journal of Food Engineering, 2018, 14(2): 5-6.
- [17] 彭飞, 张国栋, 孔丹丹, 等. 豆粕热物理特性的试验研究[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(5): 32-37.
- Peng Fei, Zhang Guodong, Kong Dandan, et al. Experimental research on thermal physical properties of soybean meal[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(5): 32-37. (in Chinese with English abstract)
- [18] 马效松, 付强, 徐淑琴, 等. 生物炭对北方寒区农田土壤热性能参数的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 298-305.
- Ma Xiaosong, Fu Qiang, Xu Shuqin, et al. Influence of biochar on soil thermal properties in northern cold regions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 298-305. (in Chinese with English abstract)
- [19] 孔丹丹, 方鹏, 金楠, 等. 温度和粉碎粒度对不同能量饲料原料热物理特性的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(6): 296-306.
- Kong Dandan, Fang Peng, Jin Nan, et al. Effect of temperature and particle size on thermophysical properties of different energy feed stuffs material[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE) 2019, 35(6): 296-306. (in Chinese with English abstract)
- [20] Liu C, Fu J Y, Hou Y, et al. An effective method for evaluating thermal parameters of diode-based thermal sensors[J]. Measurement, 2020, 156(41): 222-225.
- [21] 周祖锴. 农业物科学[M]. 北京: 农业出版社, 1994: 221-248.
- [22] 杨洲, 罗锡文, 李长友. 稻谷热特性参数的试验测定[J]. 农业机械学报, 2003, 34(4): 76-78.
- Yang Zhou, Luo Xiwen, Li Changyou. Measurement of thermal properties of rough rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(4): 76-78. (in Chinese with English abstract)
- [23] Dong H, Liu G, Tong G, et al. Influence of temperature-dependent acoustic and thermal parameters and nonlinear harmonics on the prediction of thermal lesion under HIFU ablation[J]. Mathematical Biosciences and Engineering, 2021, 18(2): 1340-1351.
- [24] Wu Y B, Wang Y, Ren X, et al. Replacement of fish meal with gamma-ray irradiated soybean meal in the diets of largemouth bass *Micropterus salmoides*[J]. Aquaculture Nutrition, 2021, 27(4): 977-985.
- [25] Elansari A M, Hobani A I. Effect of temperature and moisture content on thermal conductivity of four types of meat[J]. International Journal of Food Properties, 2009, 12(2): 308-315.
- [26] Raigar R K, Mishra H N. Effect of moisture content and particle sizes on physical and thermal properties of roasted bengal gram flour[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, 39(6): 1839-1844.

Inversion of the thermal property parameters of fish feed based on adjoint equation method

Chen Jiyuan¹, Wang Liangju¹, Wang Hongying^{1*}, Zhang Guodong², Wang Wei¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. COFCO Grains Holdings Limited, Beijing 100020, China)

Abstract: Thermal properties of feed and artificial experience have been generally considered, when adjusting the process parameters of hygrothermal treatment in the production of fish feed, including cooling and drying. Specific heat, thermal conductivity, and thermal diffusivity are the important thermal properties of fish feed. In this study, grass carp (adult fish) extruded feed was taken as the research object. The inversion algorithm was established to obtain the temperature distribution of feed using the adjoint equation. A test was also carried out using the self-developed heat conduction device and infrared thermal imager. When testing, the feed was quickly spread on the cast aluminum soaking plate, where the feed was closely arranged in a single layer, with a thickness of about 4 mm and a total of about 10 g. The infrared thermal images were captured for the feed layer surface and the upper surface on the cast aluminum soaking plate using the infrared thermal imager (accuracy $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$). SmartView software was selected to process the infrared thermal images for the temperature-time data of the feed sample test surface ($x=h$) and heating surface ($x=0$), from the $T-t$ data of heating surface $x=0$ and the feed sample test surface $x=h$. MATLAB software was selected first to solve the adjoint equation for the adjoint variables, then obtain the gradient value, and finally obtain specific heat c and thermal conductivity k . As such, the specific heat, thermal conductivity, and thermal diffusivity of feed were obtained, according to temperature distribution with the moisture content of 11%-17% and the temperature range of 20-80 $^{\circ}\text{C}$. The results show that the specific heat of grass carp extruded feed was 1.710-1.840 kJ/(kg $\cdot^{\circ}\text{C}$). Specific heat of feed increased significantly with the increase of temperature ($P<0.05$). When the moisture content increased from 11% to 17%, the specific heat of feed increased significantly ($P<0.05$), indicating a linear law. The thermal conductivity of grass carp extruded feed was 0.086-0.148 W/(m $\cdot\text{K}$). When the temperature increased from 20 $^{\circ}\text{C}$ to 80 $^{\circ}\text{C}$, the thermal conductivity of grass carp extruded feed increased significantly ($P<0.05$). The effect of water content was also significant ($P<0.05$). The thermal diffusivity of feed ranged from 5.701 to 10.003 m^2/s , depending significantly on temperature and moisture content ($P<0.05$). At the same time, the specific heat and thermal conductivity of feed were measured by Differential Scanning Calorimetry (DSC) and thermal characteristic analyzer, respectively, where the thermal diffusivity was calculated as the measured value. Before the test, the feed particles needed to be crushed. The inversion datum was taken as the calculated values. The linear fitting showed that R^2 was equal or greater than 0.980, indicating the feasible determination of thermal characteristic parameters of fish extruded feed using the inversion. The finding can provide a new idea for the determination of the thermal properties of fish feed.

Keywords: inversion; specific heat; thermal conductivity; thermal diffusivity; fish feed