

文章编号:1000-0615(2008)05-811-05

## 不同温度下鳗热导率的测试

张 敏<sup>1</sup>, 张雷杰<sup>1</sup>, 赵惠忠<sup>2</sup>, 张 杰<sup>3</sup>, 杨 乐<sup>1</sup>

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 200090;

2. 上海理工大学城市建设与环境工程学院, 上海 200093;

3. 河南省气象局, 河南 郑州 450003)

**摘要:** 为了解决目前水产品在不同温度下热物性参数数据缺乏的问题, 采用微热探针法测试系统对  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度范围内鳗的热导率进行了系统测试。该测试装置简单、方便, 测试时间短(小于 40 s), 试样温升小( $<2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 测试过程中可较为准确地反映试样所处状态的实际物性值。实验测定了  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  等 6 种不同温度条件下鳗的热导率, 测试结果表明: 在保证较高的测量精度前提下, 微热探针法测试系统可方便地测定鳗在不同温度条件下发生相变前后的热导率。温度对鳗的热导率具有显著影响, 在冻结点以上, 鳗的热导率随温度的升高而增加, 而在冻结点以下, 其热导率迅速增高, 且随温度的下降而呈递增趋势。这一结果可为研究鳗冻结、解冻过程的工程计算提供准确的热物理性质参数, 并可为今后研究冷冻或解冻过程的计算机模拟提供基础。

**关键词:** 鳗; 微热探针; 温度; 热导率

**中图分类号:** TS 201

**文献标识码:** A

水产品在其贮藏、加工、运输过程中均伴随着热量的交换和传递, 这些加工工艺及其设备的设计, 都需要了解水产品的热物性参数, 其中热导率是一项重要的热物性参数。Sanz 等<sup>[1]</sup>于 1987 年对肉类产品的热物理性质的研究进行了综述, 并把实验数据进行了汇总, 但是对于水产品等食物的热物理性质往往只给出一个特定温度下的值或大致范围, 使用起来既不准确又不全面。而在国内, 这方面的研究目前也进行得较少<sup>[2]</sup>, 尤其是水产品的冷冻或解冻过程主要阶段发生在冻结点以下, 而在冻结点以下时(一般鱼、肉类食物的冻结点为  $0\text{ }^{\circ}\text{C}\sim -3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 鱼、肉类食物的热物理性质随温度有明显的变化, 因此有必要深入了解不同温度对水产品热物理性质参数的影响规律, 在实验测试的基础上建立热物理参数经验公式, 这既可为研究冻结、解冻过程的工程计算提供准确

的热物理性质参数, 也可为今后研究冷冻或解冻过程的计算机模拟提供基础。

### 1 测试装置

#### 1.1 微热探针

采用内外径分别为  $0.3\text{ mm}$  和  $0.7\text{ mm}$ , 针长  $30\text{ mm}$  的不锈钢管作为探针的套管, 将直径为  $0.02\text{ mm}$  漆包铜丝绕成 20 匝, 封装入内。铜丝既作为加热元件又作为测温元件, 阻值为  $65.5\ \Omega$ , 引出导线为直径  $0.2\text{ mm}$  的漆包铜丝, 其电阻小于  $0.1\ \Omega$ , 其分压作用可忽略。铜丝与管套间用导热性能良好且电绝缘的真空硅脂填充, 最后用环氧树脂胶将探针两端密封固定。微热探针结构如图 1 所示。

#### 1.2 测试系统

基于线热源瞬态模型的微热探针法热导率测试系统, 其基本测量原理与热丝法相同<sup>[3]</sup>。测试

收稿日期: 2007-10-10

资助项目: 国家自然科学基金(30771245); 上海市重点学科建设项目(T1102); 上海市重点课程建设项目(6700308)

作者简介: 张 敏(1969-), 女, 河南郑州人, 教授, 博士, 主要从事生物传热及食品冷藏保鲜方向的研究。Tel: 13371935929,

E-mail: zhangm@shou.edu.cn

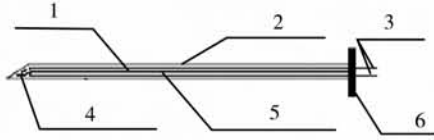


图1 微热探针结构示意图

1. 铜丝; 2. 不锈钢管; 3. 引线; 4. 树脂胶; 5. 导热硅脂; 6. 绝缘封头

Fig. 1 Schematic structure of tiny thermal probe

1. copper wire; 2. stainless tube; 3. direction wire; 4. synthetic resin; 5. silicon grease; 6. insulated cover

时将热探针插入待测样品,初始状态下,热探针和被测样品处于同一温度,然后,对热探针内的铜丝施加一恒定电压时,会引起铜丝、电绝缘层、不锈钢套管和待测样品温度升高,只要测出探针温度随时间的变化,并计算温升随时间对数变化的斜率,可以求得被测试样品的热导率<sup>[4]</sup>。

铜丝的温升

$$\theta_w(r, t) = -\frac{q}{4\pi\lambda} \left\{ \ln 4 \left( \frac{\alpha_m t}{r_p^2} \right) - \gamma + \frac{2\lambda_m}{\lambda_p} \ln \frac{r_p}{r_w} + \frac{1 - (r/r_w)^2}{\lambda_w/\lambda_m} \right\} \quad (1)$$

式中,  $\gamma$  —— 欧拉常数

$\theta$  —— 铜丝温度与初始室温的差值, K

$\lambda$  —— 热导率,  $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$

$\alpha$  —— 热扩散系数,  $m^2 \cdot s^{-1}$

$t$  —— 加热时间, s

$r$  —— 径向坐标值, m

$q$  —— 单位长度铜丝的发热功率,  $W \cdot m^{-1}$

下标  $w$ 、 $p$ 、 $m$  分别代表铜丝、不锈钢套管、待测样品;

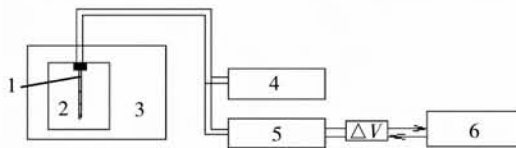


图2 测量系统示意图

1. 微热探针; 2. 样品; 3. 可调恒温恒湿箱; 4. 稳压电源; 5. 控制电路; 6. 数据采集系统

Fig. 2 Schematic diagram of the measurement system

1. Tiny heat probe; 2. sample; 3. Adjustable constant temperature chamber; 4. DC stabilized power supply; 5. Control circuit; 6. Data acquisition system

整个实验装置如图2所示。将不锈钢探针插入放置于可调恒温恒湿箱(控温范围:  $-5 \sim$

$85 \text{ }^\circ\text{C}$ , 上海一恒科技有限公司生产)内的待测样品内,由HY系列高精度可调恒压直流稳压电源(电压范围:  $0 \sim 30 \text{ V}$ , 淮安亚光电子有限公司生产)对探针施以恒定的电压,会引起探针内部铜丝受热升温,探针电阻发生变化,从控制电路中输出一微弱电压差信号  $\Delta V$ ,经2700型多路数据测试采集系统(美国 Keithley 公司)放大转换并输入计算机处理,可得到被测样品的热导率<sup>[5]</sup>:

$$\lambda_m = \frac{E^3 C}{R_0^2} \frac{d(\Delta V)}{d(\ln t)} \quad (2)$$

式(2)就是整个实验系统的测量关系式,式中:

$C = \frac{\alpha_0 R_0}{64\pi L}$  为探针的仪器常数,  $\Omega \cdot (m \cdot K \cdot s)^{-1}$ , 仅与探针本身材料和长度有关,而与测试系统加热功率、测试温度无关<sup>[6]</sup>;  $L$  为铜丝长度, m;  $R_0$  为  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  时的铜丝的电阻,  $\Omega$ ;  $\alpha_0$  为  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  时的铜丝温度系数,  $1/^\circ\text{C}$ ;  $\Delta V$  为电路输出电压差, V;  $t$  为加热时间, s;  $\lambda_m$  为待测样品的热导率,  $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$ ;  $E$  为稳压电源的电压, V;  $R_0$  为探针的初始电阻,  $\Omega$ 。

## 2 实验

### 2.1 热探针仪器常数的标定

实际测量中,首先对热探针进行标定。采用大于或等于 99% 的分析纯丙三醇对热探针进行标定,根据丙三醇已知的标准热导率,由式(2)计算出热探针的仪器常数。同一条件下测试 8 次,且每次偏差小于  $\pm 2\%$ ,然后求其平均值,得到仪器常数  $C$  值。

图3、图4分别显示了  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  下探针加热丙三醇时测试系统输出的电压信号变化值与时间  $t$  和

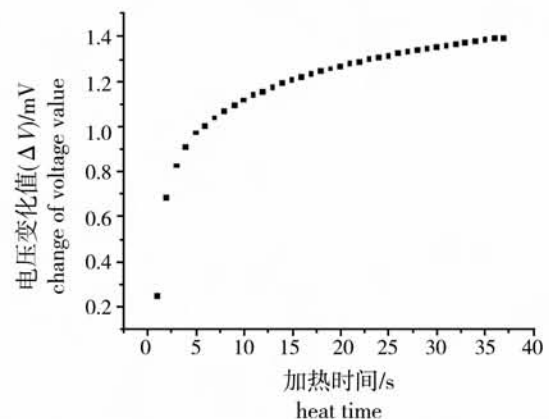


图3 输出电压随时间的变化

Fig. 3 Changes of output voltage with heat time

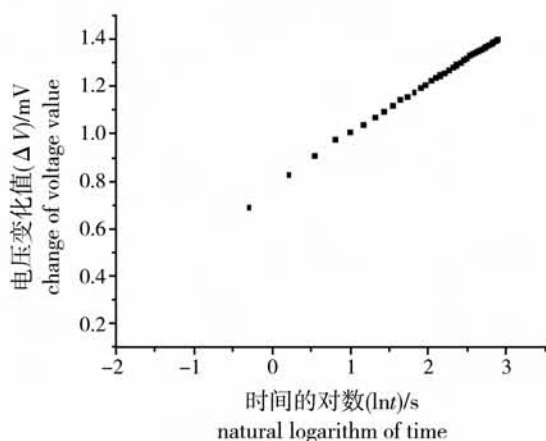


图 4 输出电压随时间对数的变化  
Fig. 4 Changes of output voltage with natural logarithm of heat time

时间对数的变化曲线。可以看出,当时间  $t > 2$  s 后,电压变化值与时间的对数值呈现高度线性相关性,线性相关度  $R^2 > 0.9999$ 。

从图 3、图 4 中可以看出,整个测试过程加热时间较短(小于 40 s),系统输出最大电压差  $\Delta V$  较小(小于 2 mV),由此可计算得到试样的温升较小(小于  $2^\circ\text{C}$ ),这样就有效地克服了丙三醇自然对流对测试结果的影响,能较准确地反映试样所处实际状态的物性值。

按上述步骤,根据不同温度条件下丙三醇的

热导率值,在  $-30^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$  条件下对探针进行标定,可得到探针不同温度下的仪器常数值,如表 1 所示,可以看出探针的仪器常数在上述温度范围内时,仪器常数接近于固定值,变化不大,本次实验中,热探针的仪器常数  $C = 0.0354$ ,偏差为  $\pm 0.28\%$ ,在实际测量中可忽略不计。

表 1 探针不同温度下的仪器常数  
Tab. 1 Instrument constant of the tiny thermal conductivity probe at different temperature

环境温度( $^\circ\text{C}$ ) air temperature	仪器常数 [ $\Omega \cdot (\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{s})^{-1}$ ] apparatus constant
20	0.0354
10	0.0354
0	0.0355
-10	0.0353
-20	0.0353
-30	0.0355

## 2.2 检验

为了检验本方法的可靠性和测量精度,实验选择样品乙二醇 46.4% wt 水溶液和  $\text{CaCl}_2$  25.7% wt 水溶液在  $-30^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$  温区进行测试,求得各样品热导率,并与文献值比较,测试结果见表 2、表 3,与文献[7]的值相比,在  $-30^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$  温区样品测量的最大相对误差分别为 3.49% 和 3.85%。

表 2 乙二醇 46.4%wt 热导率

Tab. 2 Thermal conductivity of glycol with 46.4%wt

温度( $^\circ\text{C}$ ) temperature	测量值 [ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ] measurement value	文献值 <sup>[7]</sup> [ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ] literature value	相对误差(%) relative error
20	0.439	0.430	2.09
10	0.432	0.430	0.47
0	0.435	0.430	1.16
-10	0.441	0.430	2.56
-20	0.436	0.430	1.40
-30	0.445	0.430	3.49

表 3 氯化钙 25.7%wt 热导率

Tab. 3 Thermal conductivity of calcium chloride with 25.7%wt

温度( $^\circ\text{C}$ ) temperature	测量值 [ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ] measurement value	文献值 <sup>[7]</sup> [ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ] literature value	相对误差(%) relative error
20	0.579	0.562	3.02
10	0.555	0.548	1.28
0	0.538	0.535	0.56
-10	0.536	0.521	2.88
-20	0.520	0.508	2.36
-30	0.513	0.494	3.85

### 2.3 不同温度鳗热导率的测试

将样品鳗放置在恒温恒湿箱中,分别在 20 °C、10 °C、0 °C、-10 °C、-20 °C、-30 °C 的温度条件下进行测试,依据  $C$  的值求出样品在 -30 °C ~ 20 °C 的热导率,同一条件下平行测量 6 次,且每次偏差小于  $\pm 2\%$ ,然后取其平均值。对采集的输出电位差  $\Delta V$  与时间的对数  $Lnt$  用 Excel 进行线性时段拟合处理,按相关度最大的原则,计算出  $d(\Delta V)/d(Lnt)$ ,按式(2)即可求得所测鳗的热

导率。

### 3 结果和分析

对 -30 °C 条件下鳗的测试分析数据如表 4 所示。从表 4 中可以看出,整个测试过程加热时间短,小于 20 s,试样的温升很小,不到 2 °C,能较准确地反映试样所处实际状态的物性值<sup>[8]</sup>。 $d(\Delta V)/d(Lnt)$  线性相关度  $R^2$  大于 0.9999,相对偏差小于 2%,可见测量结果复现性好。

表 4 -30 °C 鳗测试数据

Tab. 4 Measured data of *Muraenesox cinereus* at -30 °C

测试编号	稳压电源电压(V)	初始电阻( $\Omega$ )	测试时间(s)	最大电压差(mV)	最大温升( $^{\circ}\text{C}$ )	$d\Delta V/dLnt$ ( $\text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$ )	相对偏差(%)	线性相关度( $R^2$ )
no.	voltage	initial resistance	time	$\Delta V_{\max}$	$\Delta T_{\max}$		relative deviation	degree of line correlation
1	3.02	62.3	18	1.57	0.45	0.000389	-0.51	0.9999502**
2	3.02	62.3	20	1.38	0.42	0.000398	1.79	0.9999423**
3	3.02	62.3	19	1.08	0.36	0.000395	1.02	0.9999563**
4	3.02	62.3	21	1.56	0.44	0.000387	-1.02	0.9999118**
5	3.02	62.3	20	1.42	0.43	0.000385	-1.53	0.9999587**
6	3.02	62.3	20	1.31	0.42	0.000392	0.26	0.9999762**

在对标准样品测量的基础上,测量了脂肪含量为 17.6% 鳗在 -30 ~ 20 °C 温度下的热导率,测试结果如表 5 所示,从表中,可以看出鳗热导率测试偏差均小于 2%。

表 5 新鲜鳗(17.6%脂肪)热导率

Tab. 5 Thermal conductivity of *muraenesox cinereus* with 17.6% fat

温度( $^{\circ}\text{C}$ )	样品测量均值 [ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ ]	最大相对偏差(%)
temperature	mean value	maximum of relative deviation
20	0.446	1.22
10	0.352	-0.86
0	0.303	0.69
-10	0.988	1.23
-20	1.075	-1.52
-30	1.155	1.79

热导率随温度变化的情况如图 5 所示,结果表明:对于同一品种的鳗,其导热系数在冻结点以上是随着温度的下降而减小,在冻结点时突然升高,而在冻结点以下是随着温度的下降而增大。这可能是由于在冻结点以上,水的导热系数随着温度降低而减小,在冻结点,发生相变,水结成

冰,冰的导热系数比水的大得多,在冻结点以下,冰的导热系数随着温度的下降而增大,水或冰导热系数如此的变化规律导致了鳗导热系数相应的变化规律,

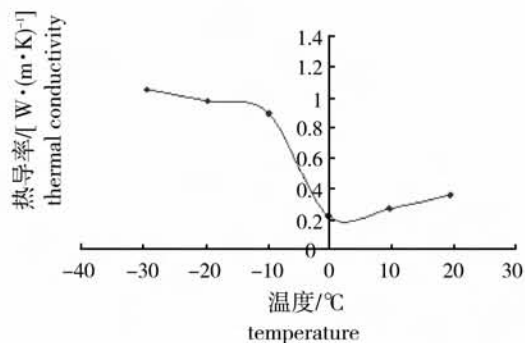


图 5 鳗热导率与温度的关系

Fig. 5 Relationship of thermal conductivity and temperature in *muraenesox cinereus*

### 4 结论

采用微热探针法测试系统对脂肪含量为 17.6% 鳗在 -30 °C ~ 20 °C 温度下的热导率进行

了测试,理论分析和实验表明,在保证较高的测量精度前提下,微热探针法测试系统可以方便地测定水产品在低温下发生相变后的热导率。在冻结点以上,鳗的热导率随温度的升高而增加,在冻结点以下,其热导率迅速增高,并随温度的下降而增大,冰在冻结相中对鳗的热导率影响较大。

#### 参考文献:

- [1] Sanz P D, Alonso M D, Mascheroni R H. Thermophysical properties of meat products [J]. Transactions of ASAE, 1987, 30 (1): 283-289.
- [2] 华泽钊,李里特,丹 阳,等. 食品冷冻冷藏原理与设备[M]. 北京:机械工业出版社,1999.
- [3] Hooper F C, Lopper F R. Transient heat flow apparatus for the measurement of thermal conductivities[J]. Trans Am Soc Heat Vent, 1950, 14: 1435-1439.
- [4] 张 敏,赵惠忠,谢 晶,等. 果蔬热导率测试系统设计和试验[J]. 农业机械学报,2006,37(1):90-93.
- [5] Cheng S X, Jiang Y F, Liang X G. A tiny probe for measuring the thermal conductivities of non-rigid materials[J]. Meas Sci Tech, 1994,5:1339-1344.
- [6] 张海峰,程曙霞,何立群. 微探针法测量低温下生物材料导热系数研究[J]. 仪器仪表学报,2004,25(2): 53-56.
- [7] 陈则韶,葛新石,顾 沁. 量热技术和热物性测量 [M]. 北京:中国科学技术出版社,1990:171-180.
- [8] Christopher M R, Dabir S V, Fu-hung H. A group contribution method for the prediction of thermal conductivity of liquids and its application to the prandtl number for vegetable oils[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1999, 38 (11): 4513-4519.

## Measurement of thermal conductivities of *Muraenesox cinereus* at different temperatures

ZHANG Min<sup>1</sup>, ZHANG Lei-jie<sup>1</sup>, ZHAO Hui-zhong<sup>2</sup>, ZHANG Jie<sup>3</sup>, YANG Le<sup>1</sup>

(1. College of Food Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 200090, China;

2. College of Urban Construction and Environment Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

3. Henan Meteorological Administration, Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** The tiny heat probe test system was used to determine the thermal conductivities of *Muraenesox cinereus* to solve the data scarcity of thermal parameters of aquatic products at different temperatures (from -30 to 20 °C). It was convenient, easy to handle, required less time (<40 s), caused a little temperature rise (<2 °C) of the tested sample and was suitable for measuring thermal conductivities of sample with true states. And then the thermal conductivities of *Muraenesox cinereus* were measured at 20 °C, 10 °C, 0 °C, -10 °C, -20 °C and -30 °C in detail. The results showed that the thermal conductivities of *Muraenesox cinereus* pre or behind phase transition can be obtained with the high precision by means of the tiny heat probe test system at different temperatures. Temperature had a significant influence on the thermal conductivities of *Muraenesox cinereus*. The thermal conductivities increased with temperature over the freezing point. The thermal conductivities rapidly increased below the freezing point and it increased with the temperature decreasing. And these studies may give some help to the engineering calculations and computer simulation in the course of freezing and thawing of *Muraenesox cinereus*.

**Key words:** *Muraenesox cinereus*; tiny heat probe; temperature; thermal conductivities