测定生物软组织导热系数的微型热针

梁新刚　葛新石　张寅平　王桂娟

(中国科学技术大学工程热物理系，合肥 230026)

关键词　导热系数、热针、生物组织

近年来我国在热物性研究领域开展了大量工作，并获得了许多成果[1]，但涉及生物和医学工程的生物软组织导热系数的测定尚处于起步阶段．本文作者在国内首次利用微型热针对猪肉类和内脏器官进行了测试，获得了满意的结果．这种微型热针具有使用方便、测试时间短、湿迁移小的优点，一般毋需改变被测样品的形状，而且可以用来对水果和蔬菜的导热系数进行测试．

一、测 量 原 理

描述无限大介质中径向一维热流的偏微分方程为

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}=\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t}, \tag{1}$$

式中 T 为介质的温度，r 是径向坐标，t 是时间，α 为介质的热扩散系数．

假定有一由理想导热体制成、半径为 r_0 的热针埋于介质之中，并和介质处于均匀的温度 T_i，这时给热针通以恒定电流 I，则热针发热并加热被测介质．当 $\alpha t/r_0^2 \gg 1$ 时，热针温升的解为[2]

$$T-T_i=\frac{I^2R}{4\pi k}\left(\ln\frac{4\alpha t}{r_0^2}-0.5772\right), \tag{2}$$

式中 k 为介质的导热系数，R 为热针的单位长度电阻 (Ω/m)．当 k 为常数时可得

$$k=\frac{I^2R}{4\pi}\Big/\frac{dT}{d\ln t}. \tag{3}$$

在本工作的实验中，热针测试时的温升控制在 1—10K 之间，可以认为 k 是常数．

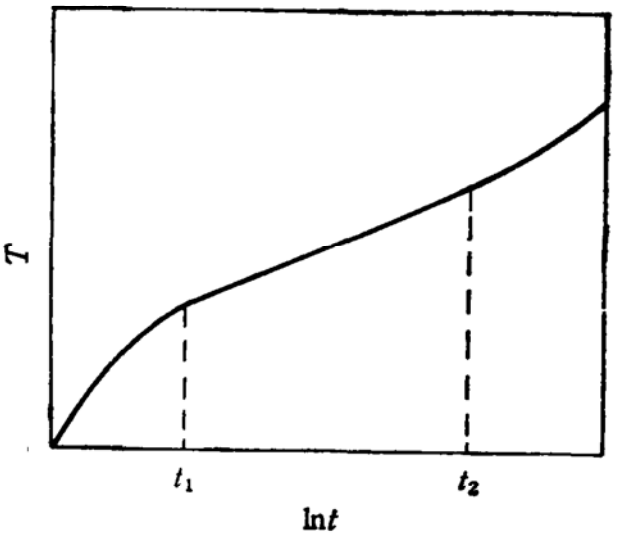


图 1　典型的热针温升曲线

由式(2)可以看出，当时间足够长，热针的温度 T 和 $\ln t$ 成线性关系，进而可由(3)式确定被测介质的导热系数．

图 1 为典型的热针温升曲线．当 $t > t_1$，满足 $\alpha t/r_0^2 \gg 1$ 的条件时，T 与 $\ln t$ 成线性关

本文 1991 年 3 月 5 日收到．1991 年 5 月 28 日收到修改稿．

系；当 $t > t_2$ 时，被测介质的径向边界开始对热针温度变化产生影响. 文献[3]用一维近似的方法对这种样品有限性的影响作了保守的计算，结果表明，当样品的径向边界半径 $R_0 > 2\times(at)^{\frac{1}{2}}$ 时，外边缘的影响小于0.1%. 同时，为保证一维的径向热流，Blackwell 建议热针的长度与直径之比大于25[4]，而且样品的长度不小于 $(4at/0.0632)^{\frac{1}{2}}$[5].

二、热　针

热针的制作方法如下：采用外径0.9mm、内径0.5mm的不锈钢管，长度在40—50mm之间，将均匀绕制的电加热线圈和测温热电偶置于其中. 热电偶的热节点在热针中部、紧贴管内壁. 加热线圈与针管内壁之间填以特殊材料，用以保证电绝缘和良好的热接触. 所有的引线在管内由一端引出，并用环氧树脂固定.

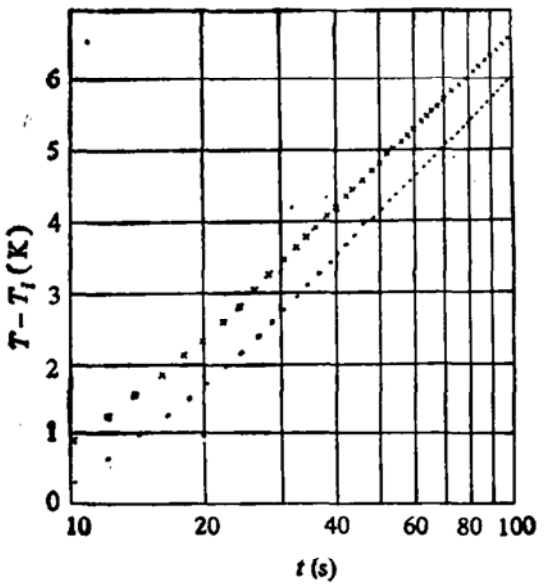


图2　热针管内壁和管外壁的温升曲线
×管内壁；　●管外壁

实际的热针并非理想导热体，其导热系数是有限的，热电偶在热针中径向的位置可能会引起测试误差. 但是和被测介质相比，热针本身的导热系数很大，针管内外壁表面温差很小，而且随着测试时间的增加，整个系统接近准稳态，内外壁的 $dT/d\ln t$ 相差很小. 实验也证实了这一点. 图2显示了热电偶分别放在管内壁和外壁表面时的温升. 当时间足够长时，两条曲线呈直线且相互平行. 在作者的测试范围内，管内壁和管外壁表面的 $dT/d\ln t$ 之差小于2%.

测试时，采用直流稳压电源为热针提供恒定电流. 热电偶输出的信号可以使用数字电压表或长途记录仪采集，并将其绘制在半对数坐标纸上，取线性段数据用最小二乘法进行拟合，以求得 $dT/d\ln t$.

三、测试结果与讨论

为了检验热针的准确性，作者测定了甘油、黑橡胶、泡沫塑料的导热系数，并和文献[6]的推荐值及本实验室研制的 KDR-1 型[7]导热系数测定仪测试的结果作了比较(表1).

表1　热针和其它方法测试结果的比较

	甘　油	黑橡胶	泡沫塑料
热针 (W/m·K)	0.290	0.560	0.0511
重复精度(%)	3.5	2.0	1.7
文献[6](W/m·K)	0.286	——	——
KDR-1[7] (W/m·K)	——	0.561	0.0510
相对偏差 (%)	1.4	0.2	0.2

很明显，甘油的测试结果最差，原因在于测试过程中存在一定程度上的自然对流. 黑橡胶和泡沫塑料的测试值和文献[7]的仪器测试结果符合很好. 需要说明的是 KDR-1 型导热系数

测定仪测量固体时的误差为5%，因此作者认为本文介绍的微型热针的测量误差为5%。

利用该热针测试了鲜猪肉、猪肝、猪肾的导热系数，以及它们冷冻解冻后的导热系数值，结果列于表2和表3。测量结果表明，肥肉的导热系数最小，为0.206W/m·K，和文献[8]用相对法得到的测量结果(0.238W/m·K)相符。猪肾的导热系数最大，而猪肉的导热系数则介于猪肾和肥肉之间。因猪的肝、肾及瘦肉的含水量高，所以它们的导热系数值接近于水的导热系数值。肥肉的含水量最低，它的导热系数最小。由此可见，水分含量的多少在很大程度上决定了生物组织导热系数的大小。实验中还发现肉的肥瘦比例对导热系数有影响，但对于纯肌肉，导热系数基本不变。表2和表3的比较说明冷冻对肉类的导热系数没有影响。表4给出了热针垂直和平行于肌肉纤维时的测量结果，说明了肌肉纤维的方向对导热系数的大小没有影响。

表2 常温下新鲜猪肉、猪肝、猪肾的导热系数

	纯肥肉	猪 肉	猪 肝	猪 肾
λ(W/m·K)	0.206	0.464	0.507	0.556
重复精度(%)	1.4	2.5	4.5	2.5
文献[8]的结果 (W/m·K)	0.238	——	——	——

表3 解冻后常温下猪肉、猪肝、猪肾的导热系数

	猪 肉	猪 肝	猪 肾
λ(W/m·K)	0.463	0.507	0.540
重复精度(%)	0.6	3.9	2.9

表4 热针平行与垂直于肌肉纤维时的测量结果

	平行于肌肉纤维	垂直于肌肉纤维
λ(W/m·K)	0.513	0.514
重复精度(%)	0.9	2.0

参 考 文 献

[1] Wang Buxuan et al., *Proceedings of the 1st Asian Thermophysical Property Conference*, 1986.

[2] Carslar, H. S. and Jeagar, J. C., *Conduction of Heat n Solids*, 2nd ed., Claredon, Oxford, 1959, 341—345.

[3] Andersson, P. and Backstrom, G., *Rev. Sci. Instrum.*, 47(1976), 2: 205—209.

[4] Blackwell, J. H., *Can. J. Phys.*, 34(1956), 412—417.

[5] Blackwell, J. H., *J. Appl. Phys.*, 25(1954), 2: 137—144.

[6] Touloukian, Y. S. et al., *Thermophycsical Properties of Mater.* Vol. 3, IFI/Plenum Press, New York, Washington, 1970, 209.

[7] 宋又王、鹰吉林、傅绍银，仪器仪表学报，6(1985)，4：369—381.

[8] Touloukian, Y. S. et al., *Thermophysical Properties of Mater*, Vol. 2, IFI/Plenum Press, New York, Washington, 1970, 1072.