第 26 卷 增刊
2005 年 6 月

工 程 热 物 理 学 报
JOURNAL OF ENGINEERING THERMOPHYSICS

Vol.26, Suppl.
Jun., 2005

# 一种测量生物组织热导率的新方法

杨 昆 刘 伟

（华中科技大学能源与动力工程学院， 武汉 430074 ）

**摘 要** 采用脉冲衰减法可以测量生物组织热导率。但是， Chen 等人提出的脉冲衰减法采用了“点热源”假设，而实际测量时，探头有一定的几何尺寸，由此造成了测量时的模型误差。本文采用数值实验的方法对这一误差及其影响因素进行了分析。在此基础上，提出了一种考虑了探头尺寸影响的新的脉冲衰减法，推导出了其测量公式。采用已知热导率的工质进行了验证试验，实验测量结果证实了本文对原有测量方法误差的分析；同时也表明，采用本文提出方法可以将测量误差减小到 5% 以下。

**关键词**： 热导率；生物组织；脉冲衰减法；热疗
**中图分类号**：R138 **文献标识码**：A **文章编号**：0253-231X(2005)Suppl.-0195-04

# A NOVEL MODEL FOR MEASUREMENT OF TISSUE THERMAL CONDUCTIVITY

YANG Kun LIU Wei

(*College of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

**Abstract** The existing thermal pulse-decay method presented by Chen et al can be used to measure the thermal conductivity of bio-tissue, in which the probe bead was assumed to be a heating point source. However, the actual size of the probe bead is finite. Therefore, this assumption would induce a model error in the measurement result. In this paper, a numerical experiment method is used to analyses the model error; and a novel model of the thermal pulse-decay method is presented, in which the effects of the size of the probe bead are considered. The corresponding measurement formula is also developed. To test the accuracy of the thermal conductivity measured by using the two methods, five liquid standards whose thermal conductivities are already known are used. The experiment results prove our analysis for the model error of the existing thermal pulse-decay method. Moreover, the experiment results show that the measurement error can be reduced to smaller than 5% by using the novel model.

**Key words** thermal conductivity; biological tissue; thermal pulse-decay method; thermal therapy

## 1 引 言

生物组织热导率的测量对生物热物理研究有重要意义，特别是在肿瘤热疗等临床医学领域有广泛的应用价值。目前，能够成功测量生物组织热导率的方法主要是几种热瞬态技术，如阶跃温升法 [1]、脉冲衰减法 [2]。这二者相比，脉冲衰减法不需要引入复杂的控制模块对探头温度进行控制，因此其实际测量过程比较简单，易于实现。但是，现有的脉冲衰减法由于采用了“点热源”假设，造成测量时存在较大的模型误差。为此，有必要改进测量模型，以减小测量时的模型误差，提高测量精度。

## 2 脉冲衰减法测量原理 [2]

采用脉冲衰减法测量生物组织的热导率时，一个热敏电阻探头被引导至生物组织的预定位置，并且为周围组织所包裹。初始时，探头温度与周围组织温度处于平衡状态，在测量过程的前半段，探头用于输入电功率以产生热量使得探头温度升高，在测量的后半段，停止输入电功，探头温度将下降，此时，热敏电阻探头用于测量温度。脉冲－衰减法的

**收稿日期**：2005-03-13；**修订日期**：2005-05-12
**基金项目**：中国博士后科学基金资助项目 (No. 2004036436)
**作者简介**：杨 昆 (1974- )，男，广西桂林人，博士，主要从事生物传热理论研究及生物热物理参数的测量。

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

主要思想就是通过测量给定脉冲加热能量后一段时间内探头温度随时间的衰减过程来确定生物组织的热导率。

测量时，生物组织中受影响区域是随测量时间的增加而扩大的，因此，可以通过选择适当的测量时间以改变有效测量样品的体积。当探头半径比较小时，可以假设探头为一点热源。由此，对一个常功率的脉冲输入，可求得探头温度响应为：

$$\theta(t)=\frac{(\rho_t C_t)^{0.5}P}{4\pi^{1.5}k_t^{1.5}}\left[(t-t_p)^{-0.5}-t^{-0.5}\right]\quad t>tp \quad (1)$$

式中，$\rho_t$、$C_t$、$k_t$ 分别为被测组织的密度、比热和热导率，$t_p$ 为脉冲持续时间，$P$ 为脉冲输入功率，$t$ 为测量时间。

测量时，为了减少测量误差，可以选择一个优化时间段内的探头温度测量数据[3]，根据式 (1)，采用最小二乘法进行数据拟合，即可求得 $k_t$。

## 3 “点热源”假设引起的热导率模型误差

在上述脉冲衰减法测量公式的推导过程中，Chen[2] 将探头假设为一个点热源，亦即认为探头尺寸是无穷小的。实际测量时，探头有限尺寸的影响不能忽略，这一假设是造成采用脉冲 - 衰减法测量生物组织热导率时存在模型误差的根源。Arkin[3] 等人分析了这一模型误差，但在他们的分析中，假设探头测量温度为探头表面温度，这显然与实际情况有差别。

为了准确分析这一模型误差，我们采用了数值实验的方法。在数值实验时，首先按照脉冲衰减法的实际测量过程建立数学模型，给定组织热导率 $k_t^0$ 作为模型的输入参数，然后数值求解该数学模型，得到探头温度随时间变化数据，再由探头温度数据，求得组织热导率 $k_t^1$，从而脉冲衰减法测量组织热导率的模型误差可由下式求得：

$$\varepsilon_{k_t}=\frac{k_t^1-k_t^0}{k_t^0}\times 100\%$$

图 1 比较了热导率模型误差随测量时间的变化，数值实验采用的 $(\rho_t\times C_t)=3\times10^6\ \mathrm{J/m^3{}^\circ C}$，生物组织热导率为 $0.3\sim0.6\ \mathrm{W/m^\circ C}$。图中模型误差均为正值，这说明数值实验得到的热导率值要比数值实验中给定的生物组织热导率值大。在脉冲后较短时间内，热导率模型误差比较大，随测量时间的增加，预测得到的热导率的误差减小；随生物组织热导率的增加，热导率的误差亦减小。

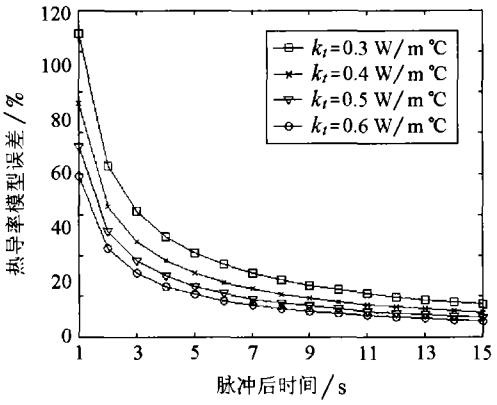


图 1 热导率模型误差随测量时间的变化

图 2 比较了热导率误差随探头半径 $a$ 的变化，数值实验采用的 $(\rho_t\times C_t)=3\times10^6\ \mathrm{J/m^3{}^\circ C}$，生物组织热导率为 $0.4\ \mathrm{W/m^\circ C}$，探头半径为 $0.3\sim0.6$ mm。可以发现，探头半径对热导率的模型误差有重要影响，随探头半径的减少，热导率的误差迅速减小。

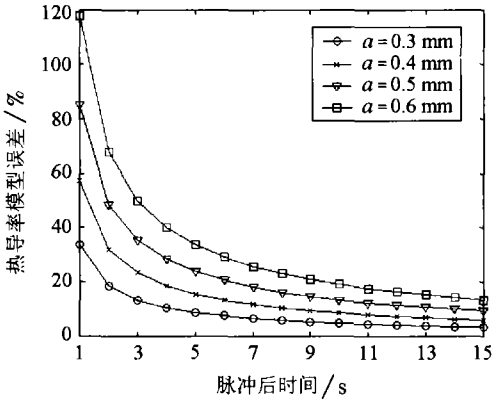


图 2 热导率模型误差随探头半径的变化

采用脉冲衰减法进行测量时，随测量时间的增加，生物组织中受影响区域是不断扩大的，其探头温度响应反映了探头及测量过程中生物组织中受影响区域的热物性参数的综合影响。对本文模拟的所有情况，当测量时间比较短时，预测的生物组织热导率的模型误差都比较大。这主要是由于脉冲后的短时间内，探头的几何尺寸不能忽略，不能看作一点热源；随着测量时间的增加，生物组织受影响的区域增大，热敏电阻探头的几何尺寸与生物组织受影响区域的尺寸之比逐渐减小，热敏电阻探头的几何尺寸的影响趋于减弱；当测量的时间比较长时，“点热源”假设可认为近似成立，因此，预测的生物组织热导率模型误差都随测量时间增加而减小[4]。

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

## 4 一种新的测量生物组织热导率的脉冲衰减法

考虑到上述“点热源”假设造成的热导率模型误差，在实际测量时，探头的尺寸不能忽略。由前面的分析可知，为了减小测量的模型误差，我们可以采用增加测量时间的方法。但是，采用脉冲衰减法测量时，测量时间也不能任意增加。这是因为测量时利用的时探头温度衰减段的温度信息，而随测量时间的增加，探头温度是不断减小的，此时探头温度测量误差就会造成较大的热导率测量误差[3]。因此，有必要寻求新的测量模型，以减小测量时的模型误差。

Diederich[4] 等人考虑了探头尺寸的影响，给出了探头中心温度的解析解，并以此作为探头感应温度来测量生物组织热导率，但实际测量时，探头感应温度应为探头平均温度[1]，这使得他们的测量模型仍然与真实的测量过程不相符。因此，有必要进一步对测量模型进行改进。在本文中，我们推导出了采用脉冲衰减法进行测量时热敏电阻探头的平均温度，并以此进行测量，以提高测量精度。

测量时，热敏电阻可假设为一球形热源，热源在探头中均匀分布，热源的大小等于探头的直径。分别建立探头和组织的传热方程，采用 Green 函数法可以求出探头中的温度场，再由下式可求出探头的平均温度，即：

$$\overline{\theta}(t)=\frac{\int_0^a \theta(r,t)\cdot 4\pi\cdot r^2 dr}{(4/3)\pi\cdot a^3} \tag{2}$$

将探头温度分布代入式 (2)，可以求得探头温度响应为：

$$\overline{\theta}(t)=P\int_0^{\phi} f(s)ds \qquad \phi=\begin{cases} t, t\le t_p \\ t_p, t>t_p \end{cases} \tag{3}$$

$$f(s)=f_1(s)\frac{\alpha_t}{2a^2k_t}+\frac{\alpha_t}{k_t} \tag{3a}$$

$$f_1(s)=f_2(s)-4\alpha_t(t-s)erfc\frac{a}{\sqrt{\alpha_t(t-s)}}-6a\sqrt{\frac{\alpha_t(t-s)}{\pi}} \tag{3b}$$

$$f_2(s)=4\frac{[\alpha_t(t-s)]^{3/2}}{a\sqrt{\pi}}+\{-4\frac{[\alpha_t(t-s)]^{3/2}}{a}+2a\sqrt{\alpha_t(t-s)}\}\times\{\frac{1}{\sqrt{\pi}}e^{-a^2/[\alpha_t(t-s)]}-\frac{a}{\sqrt{\alpha_t(t-s)}}erfc[\frac{a}{\sqrt{\alpha_t(t-s)}}]\} \tag{3c}$$

式中，$\alpha_t$ 为生物组织热扩散率：$\alpha_t=k_t/(\rho_t C_t)$。采用最小二乘法的方法，使得由式 (3) 预测的探头温度变化数据与实验测量得到的探头温度变化数据的差值最小，就可以求出生物组织的热导率。

## 5 测量结果

我们测量了甘油水溶液 (水中添加了少量琼脂以防止自然对流的产生) 的热导率，甘油水溶液热导率测量值分别由 (1) 式和 (3) 式算出。测量时，甘油水溶液的浓度分别为：100%、80.72%、64.75%、54.70%、44.39%，对每一种浓度的甘油水溶液，分别测量 10 次，取其平均值作为其热导率的测量值，而其热导率的计算值则根据其浓度由下式算出[5]：

$$k_{mix}=k_g p_g+k_w(1-p_g)-1.4p_g(1-p_g)(k_w-k_g-0.2)-0.0014p_g(1-p_g)(T_{mix}-20) \tag{4}$$

式中，$k_{mix}$、$k_g$、$k_w$ 分别为混合溶液、甘油和水的热导率，$p_g$ 为甘油水溶液的质量浓度，$T_{mix}$ 为混合溶液的温度。

**表 1　甘油水溶液热导率计算值与测量值的比较**

| 浓度 % | 由式 (4) 计算热导率 W/m°C | Chen 模型 热导率测量值 W/m°C | Chen 模型 误差 % | 本文模型 * 热导率测量值 W/m°C | 本文模型 * 误差 % |
|---|---|---|---|---|---|
| 100 | 0.286 | 0.331 | 15.7 | 0.275 | −3.8 |
| 80.72 | 0.323 | 0.382 | 18.3 | 0.322 | −0.3 |
| 64.75 | 0.362 | 0.448 | 23.8 | 0.380 | 5.0 |
| 54.70 | 0.391 | 0.480 | 22.8 | 0.408 | 4.3 |
| 44.39 | 0.424 | 0.511 | 20.5 | 0.435 | 2.6 |

(“*”：采用的探头半径为 0.8 mm)

表 1 比较了甘油水溶液热导率计算值与测量值。其中，对每一种浓度下热导率的测量值是采用同样的探头温度数据，根据 Chen 模型和本文模型分别进行处理得到。显然，基于“点热源”假设的脉冲衰减法测得的的甘油水溶液的热导率值要比其计算值大，这说明在测量结果中存在系统误差。根据前面的分析，这主要是由于脉冲衰减法在推导时采用的“点热源”假设造成的。根据表 1 可知，采用本文提出的新的脉冲衰减法，可以大幅度地减小测量的误差，提高测量精度。

## 6 结　论

Chen 等人提出的测量生物组织热导率的脉冲衰减法在推倒时采用了“点热源”假设，没有考虑探头尺寸的影响。本文采用数值试验的方法分析表明，这一假设造成热导率的测量值比其真实值大，二者

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

之间的误差随测量时间的增加而逐渐减少，并且受被测组织热导率及探头尺寸的影响。为了减小“点热源”假设带来的模型误差，本文提出了一种新的测量生物组织热导率的脉冲衰减法，即利用探头平均温度的理论解来测量生物组织热导率。由于考虑了探头尺寸的影响，并且与真实的测量过程比较吻合，因此可以大幅度的提高测量的精度。实验测量表明，采用本文提出的方法可以将热导率的测量误差减小到 5% 以下。

## 参 考 文 献

[1] Valvano J W, Allen J T, Bowman H F. The Simultaneous Measurement of Thermal Conductivity, Thermal Diffusivity, and perfusion in Small Volumes of Tissue. Journal of Biomechanical Engineering, 1984, 106(4): 192–197

[2] Chen M M, Holmes K R, Rupinskas V. Pulse-Decay Method for Measuring the Thermal Conductivity of Living Tissue. Journal of Biomechanical Engineering, 1981, 103(6): 253–260

[3] Arkin H, Holmes K R, Chen M M. A Sensitivity Analysis of the Thermal Pulse Decay Method for Measurement of Local Tissue Conductivity and Blood Perfusion. Journal of Biomechanical Engineering, 1986, 108(1): 54–58

[4] Diederich C J, Clegg S, Roemer R B. A Spherical Source Model for the Thermal Pulse Decay Method of Measuring Blood Perfusion: A sensitivity Analysis. Journal of Biomechanical Engineering, 1989, 111(1): 55–61

[5] Patel P A, Valvano J W, Pearce J A, et al. A Self-Heated Thermistor Technique to Measure Effective Thermal Properties from the Tissue Surface. Journal of Biomechanical Engineering, 1987, 109(5): 330–335

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net