

热凝固对生物组织热物性影响的实验研究

杨 昆 刘 伟 杨金国

(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要 本文以蛋清为实验对象,研究了热凝固对生物组织热物性的影响,测量方法为阶跃升温法。实验结果表明,热凝固后,蛋清的热导率平均上升了 6.60%。因此,生物组织的热物性不但与其化学组成有关,还与其物理状态有关;采用热凝固的方法治疗肿瘤时,应考虑热凝固对其热物性的影响,从而实现更加有效的治疗。

关键词 热凝固; 生物组织; 热物性; 热疗

中图分类号: R318 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2004)02-0314-03

AN EXPERIMENT STUDY FOR EFFECTS OF THERMAL COAGULATION ON THE THERMAL PROPERTIES OF BIOLOGICAL TISSUE

YANG Kun LIU Wei YANG Jin-Guo

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

Abstract By choosing egg white as experiment medium, the effects of thermal coagulation on the thermal properties of biological tissue are studied by using step-temperature technology. The results show that the thermal conductivity of the egg white increases about 6.60% after undergoing a thermal coagulation process. Therefore, the thermal properties of biological tissue are determined not only by its composition, but also by its physical state. Moreover, when the thermal coagulation method is used for tumor therapy, the effects of thermal coagulation on the thermal properties of biological tissue should be considered, thus a more effective treatment could be achieved.

Key words thermal coagulation; biological tissue; thermal properties; thermal therapy

1 前 言

激光热凝固是将激光释放到组织中待治疗部位,利用激光对组织热作用,使得组织凝固。组织凝固被定义为 55~95°C 温度条件下组织蛋白的不可逆热损伤^[1]。目前,肿瘤的激光凝固治疗在临床医学上得到了越来越广泛的应用。显然,激光对生物组织热效应的实现要包括激光在生物组织中的传输与热量在生物组织中的传输两个方面。因此,要准确描述激光对生物组织的热凝固过程,需要了解生物组织的光学参数与热物理参数。关于生物组织光学参数的测量,已经有很多文献加以介绍,特别地, Roggan^[2]、Cilesiz^[3] 测量了热凝固前后生物组织光学参数的变化。对生物组织的热物理参数,现有的数据很少;同时,由于生物组织个体的差异、不同测量部位以及采用不同的测量方法,现有的数据差别

很大。而热凝固对生物组织热物理参数的影响,尚未见报道。

根据经典的生物传热方程 -Pennes 方程,生物组织的传热特性主要由生物组织的热导率和血液灌注率决定。当生物组织热凝固时,血液灌注率为零;因此,本文主要研究热凝固对生物组织热导率的影响。考虑到热凝固过程主要是由于生物组织中的蛋白质的热致变性引起的,同时为了减少不同生物组织样品之间组织成分差异的影响,我们选择了蛋清作为测量的样品。表 1 列出了蛋清的化学成分,可以看出,蛋清主要由蛋白质和水构成。

通常,当生物组织热凝固时,可以看见生物组织的变白现象。当对蛋清溶液进行加热时,蛋清溶液会从透明介质变成白色不透明凝固状介质,这是组织热凝固一个最直接的例子,这也是蛋清常被选择来研究热凝固过程的一个原因^[5]。

收稿日期: 2003-12-11; 修订日期: 2004-01-11

基金项目: 国家自然科学基金重点基金资助项目 (No.59836240)

作者简介: 杨 昆 (1974-), 男, 广西桂林人, 博士研究生, 主要从事生物传热理论研究及生物热物理参数的测量。

表 1 蛋清的化学构成^[4]

水	蛋白质	脂肪	灰分	糖类
86.6%	11.6%	0.1%	0.8%	0.8%

2 测量方法

我们采用阶跃温升法来测量蛋清的热导率。阶跃温升法是根据生物组织的热响应来测量生物组织的热导率。采用阶跃温升法测量生物组织热物理参数具有探头尺寸小、测量时间短、测量时组织受影响区域小、组织非均匀性和环境热扰动的影响小、组织损伤小、可以在线测量等优点^[6,7]。

测量时, 一个球形热敏电阻探头被探针置于蛋清中。在测量过程中, 探头既用于输入测量所需功率, 又用于测量热导率和温度。探头最初与蛋清处于热平衡状态, 随着电功率的输入, 探头温度迅速上升到一预定值, 用微机控制探头的输入功率, 使探头与蛋清的温差保持恒定。输入功率随时间的变化关系即反映了蛋清热导率大小。

测量关系式如下^[8]:

$$k = 1/[3\Delta T/(\Gamma a^2) - 1/(5k_p)] \quad (1)$$

式中, k 为蛋清热导率, ΔT 为探头阶跃温升, a 和 k_p 分别为探头的半径和热导率。

Γ 的数值可由实测探头输入功率 $q(t)[q(t) = \Gamma + \beta/t]$ 按最小二乘法拟合得到。

具体的测量电路及测量过程可参考文献^[9]。

我们利用甘油水溶液来验证测量的精度, 根据文献^[10], 甘油水溶液的热导率可由下式算出:

$$k_{\text{mix}} = k_g p_g + k_w (1 - p_g) - 1.4 p_g (1 - p_g) (k_w - k_g - 0.2) - 0.0014 p_g (1 - p_g) (T_{\text{mix}} - 20) \quad (2)$$

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

测量时, 甘油水溶液的浓度分别为: 87.2%、78.6%、67.6%、58.7%、52.8%、42.7%、30.3%, 对每一种浓度的甘油水溶液, 分别测量 10 次, 取其平均的 Γ 值, 再由式 (1) 求得其热导率的测量值, 而其热导率的计算值则根据其浓度由式 (2) 算出。结果如图 1 所示。测量的最大误差为 1.7%, 平均误差为 1.09%。

实验采用的蛋清样品来源于市场出售的新鲜鸡蛋。先在 37°C 附近测量蛋清的热导率, 再将其置于 100°C 沸水中加热 15 min, 此时可以观察到蛋清已

经凝固, 然后将凝固后的蛋清冷却到 37°C 附近, 再次测量其热导率。同样的, 凝固前后蛋清样品的热导率都是由 10 次测量得到的平均 Γ 值计算得到的。实验测量了 5 个蛋清样品。

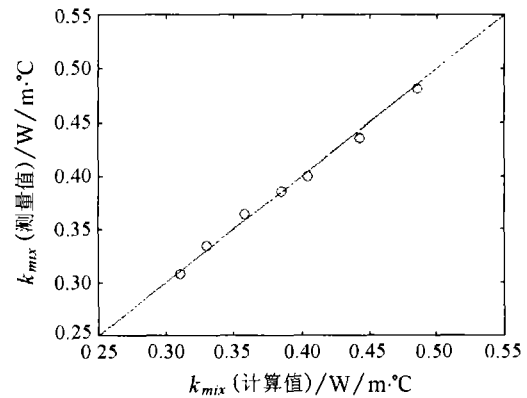


图 1 甘油水溶液热导率计算值与测量值的比较

3 结果及讨论

图 2 给出了实测及拟合得到的蛋清凝固前后热敏电阻探头随时间的变化曲线。可以看出, 为了维持同样的探头阶跃温升, 对于凝固后的蛋清, 需要更高的探头输入功率, 这意味着蛋清凝固后, 其热导率会增加。

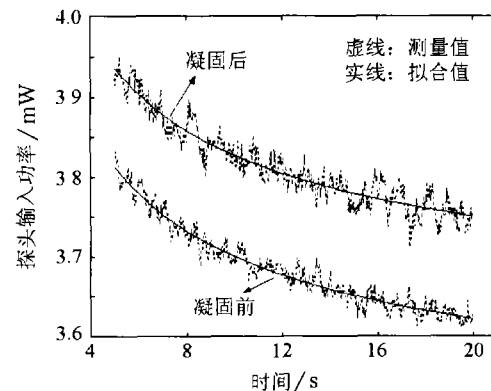


图 2 蛋清凝固前后探头输入功率随时间的变化

表 2 给出了测量得到的蛋清热凝固前后热导率数据, 可以看出, 蛋清热致凝固后, 其热导率均会上升。其增加幅度最大达 7.76%, 平均为 6.60%。

Sweat^[11] 指出, 食品的热导率可由下式算出:

$$k = 0.58m_w + 0.155m_p + 0.25m_c + 0.16m_f + 0.135m_a \quad (3)$$

式中, m_w 、 m_p 、 m_c 、 m_f 、 m_a 分别为食品中水分、蛋白质、碳水化合物、脂肪、和灰分的质量含量。

由表 1 中提供的蛋清的各组成成分的质量含量, 根据式 (3) 计算可得, 蛋清的热导率为 $0.524 \text{ w/m}^\circ\text{C}$ 。可以看出, 这一数值和我们测量得到的蛋清的热导率很接近, 并且更接近于我们测量得到的凝固后的蛋清的热导率值。

表 2 热凝固前后蛋清的热导率

样品	凝固前热导率 ($\text{w/m}^\circ\text{C}$)	凝固后热导率 ($\text{w/m}^\circ\text{C}$)	热导率变化率
1	0.477	0.514	+7.76%
2	0.460	0.488	+6.09%
3	0.464	0.500	+7.76%
4	0.463	0.493	+6.48%
5	0.468	0.491	+4.91%
平均值	0.466	0.497	+6.60%

蛋清的热凝固过程实际上是蛋清中蛋白质的热变性过程。Yoshinori Mine^[12] 给出了蛋清蛋白质的主要成分及其变性温度, 如表 3 所示。可以看出, 蛋清在 100°C 沸水中加热 15 min 后, 蛋清中蛋白质的主要成分均已达到其热变性温度, 产生了热变性。变性作用是蛋白质分子多肽链特有的有规则排列发生了变化, 成为较混乱的排列。变性作用不包括蛋白质的分解, 它仅涉及蛋白质的二、三、四级结构的变化。蛋白质受热变性的机制是因为在较高的温度下, 保持蛋白质空间构象的那些弱键断裂, 破坏了肽链的特定的排列, 原来在分子内部的一些非极性基团暴露到了分子的表面, 因而降低了蛋白质的溶解度, 促进了蛋白质分子之间相互结合而凝结, 形成不可逆凝胶而凝固^[13]。新鲜的蛋清溶液属于蛋白质溶胶, 也就是蛋白质溶于水形成的稳定的亲水胶体, 蛋清热凝固后, 蛋白质分子的多肽链之间各基团以副键相互交联, 形成立体网络结构, 水分充满网络结构之间的空间^[14]。蛋清凝固前后微观结构上的变化是其凝固前后热导率变化的原因。

表 3 蛋清中蛋白质的主要成分及其变性温度^[12]

种类	热变性温度 ($^\circ\text{C}$)
卵白蛋白	84.0
卵转铁蛋白	61.0
类卵粘蛋白	77.0
卵粘蛋白	-
溶菌酶素	75.0
G2- 球蛋白	92.5
G3- 球蛋白	-

4 结 论

(1) 蛋清热凝固时, 其物理状态由溶胶变为凝胶, 阶跃温升法可用于蛋清热凝固前后热物性的测量, 避免了采用不同方法测量带来的系统误差。

(2) 对于生物组织的热物性参数, 许多研究者认为与生物组织的成分有关。蛋清热凝固后, 由于蛋白质的一级结构没有变化, 其组成成分变化不大。但是实验测量表明, 其热导率平均上升了 6.6%, 因此, 在研究生物组织的热物性时, 应该充分考虑其所处物理状态的影响。

(3) 采用热凝固的方法治疗肿瘤时, 应该进一步研究组织热凝固对其热物性的影响, 从而实现更加有效的治疗。

参 考 文 献

- [1] 张跃. 激光凝固治疗肝癌的研究进展. 肝胆外科杂志, 2000, 8(3): 236-238
- [2] Roggan A, et al. The Optical Properties of Biological Tissue in the Near Infrared Wavelength Range-Review and Measurements. In: Muller G, Roggan A. Laser-Induced Interstitial Thermaotherapy. Washington: SPIE, 1995. 10-14
- [3] Cilesiz I F, Welch A J. Light Dosimetry: Effects of Dehydration and Thermal Damage on the Optical Properties of Human Aorta. Applied Optics. 1993, 32(4): 477-487
- [4] 南庆贤. 肉奶蛋制品加工工艺. 北京: 农业出版社, 1988. 161
- [5] Meijerink R, et al. Rate Process Parameters of Egg White measured by Light Scattering. In: Muller G, Roggan A. Laser-Induced Interstitial Thermaotherapy. Washington: SPIE, 1995. 66-80
- [6] Bowman H F. Estimation of Tissue Blood Flow. In: Shitzer A, Eberhart R C. Heat Transfer in Medicine and Biology: Analysis and Application. New York: PLENUM, 1985. 193-230
- [7] 杨昆, 刘伟, 朱光明. 阶跃温升法测量生物组织的热物性参数的误差分析. 中国生物医学工程学报, 2002, 21(3): 263-267
- [8] 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
- [9] 杨昆, 刘伟, 朱光明. 用阶跃温升法测量生物组织的热物性参数. 工程热物理学报, 2001, 22(6): 733-736
- [10] Patel P 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
- [11] 华泽钊, 李云飞, 刘宝林. 食品冷冻冷藏原理与设备. 北京: 机械工业出版社, 1999. 49
- [12] Mine Y. Recent Advances in the Understanding of Egg White Protein Functionality. Trends in Food Science & Technology, 1995, 6(7): 225-232
- [13] 天津轻工业学院, 无锡轻工业学院. 食品生物化学. 北京: 轻工业出版社, 1981. 137-138
- [14] 杜克生. 食品生物化学. 北京: 化学工业出版社, 2002. 110-111