

文章编号: 1001-3806(2002)06-0468-03

激光加热时冷冻生物组织内解冻过程的数值模拟*

周建华 刘登瀛 徐建中 淮秀兰

(中国科学院工程热物理研究所,北京,100080)

摘要: 对激光加热时冷冻生物组织内的解冻过程进行了数值模拟。结果发现,虽然激光对生物组织的加热具有容积加热的特点,但以激光为热源时,生物组织内的解冻过程仍然呈现出与普通热源加热时的解冻过程相似的规律。组织吸收系数对解冻过程有较大影响,吸收系数越高,组织解冻过程越趋于普通热源加热时的解冻过程。

关键词: 激光;生物组织;解冻;固液相变

中图分类号: TK124;Q631 **文献标识码:** A

Numerical simulation on the thawing of biological tissue induced by laser irradiation

Zhou Jianhua, Liu Dengying, Xu Jianzhong, Huai Xiulan

(Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080)

Abstract: This paper describes a numerical study on the thawing of biological tissue induced by laser irradiation. The calculating results show that, although the laser beam heats the biological tissue in a volumetric manner, the thawing process of biological tissue induced by laser heating is similar to that induced by ordinary heating source. The absorption coefficient of biological tissue has a great influence on the thawing process. When the absorption coefficient increases, the thawing process induced by laser heating approaches that induced by ordinary heating source.

Key words: laser; biological tissue; thawing; solid-liquid phase change

引言

由于激光在生物医学中的大部分应用均与热效应有关,因此,激光对生物组织热作用的研究正日益受到越来越多的关注^[1~3]。激光对生物组织的加热不同于普通方式加热(指可以按第 I 类传热边界条件处理的加热方式)的一个重要特征是,激光照射到生物组织表面后将进入组织内部发生散射和吸收,组织对激光能量的吸收是一个容积吸收过程^[4],故不能简单地按第 I 类传热边界条件处理。

既然激光加热生物组织呈现出与常规方式加热生物组织不一样的特点,那么,以激光为热源时冷冻生物组织内的解冻过程会有什么不同呢?笔者以数值计算为工具,从理论角度对这一问题进行了初步研究。由于人体组织 80% 都是由水分构成的,因

此,在正常生理温度范围内,人体组织实际上都处于液相状态。当温度降低到约 $-8 \sim -1$ 范围时,组织将从液相凝固为固相,即发生固液相变过程^[5]。鉴于此,在本文建立的数学模型中,组织解冻过程由固相融化为液相的相变传热方程予以描述,激光在组织内的吸收过程采用 Beer 指数衰减规律加以模拟。

1 计算模型

考虑一厚度为 L 的冷冻生物组织,其初始温度场均匀地处于凝固点温度 T_f 。从 $t > 0$ 时刻起,左边界表面用辐照度为 E_0 的激光进行照射。生物组织左右两表面的传热边界条件均为绝热。见图 1。

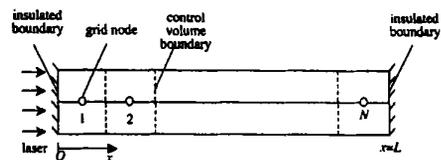


Fig. 1 Physical model

为简化讨论,作如下假定:(1)生物组织固相和液相物性相同,且为常数;(2)生物组织的凝固和解

* 国家重点基础研究发展规划资助项目。

作者简介:周建华,男,1971年5月出生。博士研究生。主要从事激光生物传热、超急速传热物质和固液相变传热的研究。

收稿日期:2001-11-02;收到修改稿日期:2001-12-07

冻发生在一个定点温度值 T_f ; (3) 未考虑组织中血液和新陈代谢的影响; (4) 未考虑激光在组织中的散射及在边界处的多次反射。

图 1 还给出了坐标系的建立及均分网格划分情况。图中, N 为总的网格节点数。

针对图 1 所示的物理模型, 建立了如下的数学模型:

$$c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \dot{q} \quad (1)$$

$$H = H_s, T = T_f \quad 0 \leq x \leq L, t = 0 \quad (2)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad x = 0, t > 0 \quad (3)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad x = L, t > 0 \quad (4)$$

$$T = T_f, k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_s - k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_l = \frac{dx_i}{dt} \quad x = x_i, t > 0 \quad (5)$$

式中, ρ 为密度; c_p 为比热容; k 为导热系数; x 为坐标; t 为时间; T 为温度; H 为焓; H_s 为固液相变潜热; 下标 f 表示凝固点, s 表示固相, l 表示液相, i 表示固液界面; \dot{q} 为组织吸收激光能量而产生的内热源。这里考虑最简单的情形, 即组织内激光能量的衰减遵循 Beer 指数衰减规律。这样, 内热源 \dot{q} 就可由右式得到:

$$\dot{q} = \mu_a \cdot E_0 \cdot e^{-\mu_a x} \quad (6)$$

式中, μ_a 为组织对激光的吸收系数。

上述问题是一个具有内热源的固液相变问题。在这个问题中, 随着组织解冻过程的进行, 固液界面位置 x_i 是移动的。这是一个具有强烈非线性特征的数学问题, 直接以温度 T 为变量进行求解将引入很大的数值振荡, 故笔者采用焓法^[6]进行求解。

首先引入如下的无量纲参数:

$$\begin{aligned} \theta &= (H - H_s) / \rho L (T - T_f), & \tau &= c_p (T - T_f) / k, \\ \tau &= t / L^2, & X &= x / L, & \dot{Q} &= \frac{\dot{q} \cdot L^2}{k} \end{aligned} \quad (7)$$

式中, θ 为无量纲焓; θ 为无量纲温度; τ 为无量纲时间; τ 为热扩散系数, $\tau = k / (\rho \cdot c_p)$; X 为无量纲坐标; \dot{Q} 为无量纲激光内热源。这样, 激光作用下生物组织解冻过程的数学描述可写为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \dot{Q} \quad (8)$$

$$\theta = 0, \quad \theta = 0, \quad \theta = 0, 0 \leq X \leq 1 \quad (9)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial X} = 0, \quad \theta > 0, X = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial X} = 0, \quad \theta > 0, X = 1 \quad (11)$$

无量纲焓与无量纲温度之间的相互换算可由下式得

到:

$$\theta = \tau + 0.5 [1 - \tau / (1 - \tau / 2)] \quad (12)$$

至此, 完成了对激光加热时冷冻生物组织内解冻过程数学模型的完整刻画。关于该模型的有限差分求解, 作者在另一篇文献中有较详细的描述^[7], 在此不再赘述。

2 计算结果及讨论

除非特别指出某一参数发生了变化, 下文中的计算结果均以如下参数为默认值: 组织厚度 $L = 5\text{mm}$, 密度 $\rho = 1000\text{kg/m}^3$, 导热系数 $k = 0.628\text{W/(m}\cdot\text{s)}$, 比热容 $c_p = 4187\text{J/(kg}\cdot\text{s)}$, 组织吸收系数 $\mu_a = 0.5\text{cm}^{-1}$, 激光辐照度 $E_0 = 1000\text{W/m}^2$, 相变潜热 $H_s = 233.4 \times 10^3\text{J/kg}$, 相变温度 (即凝固点温度) $T_f = -3^\circ\text{C}$ 。

图 2 和图 3 分别给出了上述默认值下, 组织内空间温度分布和解冻过程中固液界面位置随时间的变化情况。由

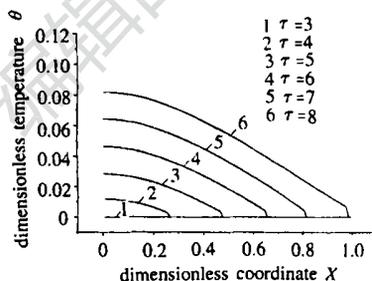


Fig. 2 Temperature distribution at different times

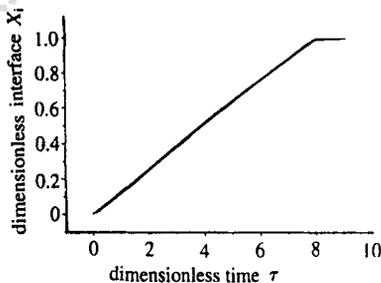


Fig. 3 Solid-liquid interface as a function of time

这两幅图可观察到与笔者的直观感觉不一样的现象, 即虽然激光对生物组织的加热具有容积加热的特点, 但以激光为热源时生物组织内的解冻过程仍然呈现出与普通热源加热时的解冻过程相似的规律。组织内各点的解冻过程并不是瞬间同时发生的, 而是仍然存在一个移动的固液界面, 从激光照射表面逐渐向组织深处移动, 而在此界面到来之前, 组织内的温度仍然保持在凝固点温度不变。这种现象可解释如下: 组织内的激光能量是随深度逐渐衰减的, 离照射表面越远, 激光能量越低; 这些较低的激光能量随着照射时间的延长而逐渐积累, 但是当积累的激光能量不足以提供固液相变所需的潜热时, 当地的温度就会始终维持在凝固点温度不变。

图 4 和图 5 则给出了吸收系数对温度空间分布

(以 $\epsilon = 5$ 为例)和固液界面位置随时间变化的影响。图4中编号为1到5的曲线分别相应于吸收系数 μ_a 为 1cm^{-1} , 5cm^{-1} , 7cm^{-1} , 10cm^{-1} 和 30cm^{-1} 的情况,图5中编号为1到3的曲线分别相应于吸收系数 μ_a 为 1cm^{-1} , 5cm^{-1} 和 7cm^{-1} 的情况。图4中

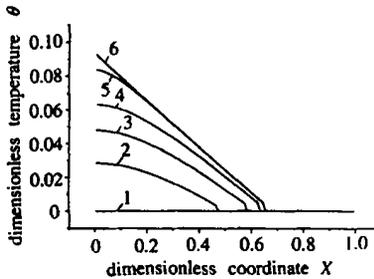


Fig. 4 Temperature distribution with different absorption coefficients ($\epsilon = 5$)

编号为6和图5中编号为4的曲线则为普通热源加热时的情况。这里的普通热源加热是指那些可以按第二类传热边界条件处理的加热方式。

由图可见,吸收系数越高,组织解冻过程越趋于普通热源加热时的解冻过程。这是由于吸收系数高意味着进入生物组织的绝大部分激光能量将

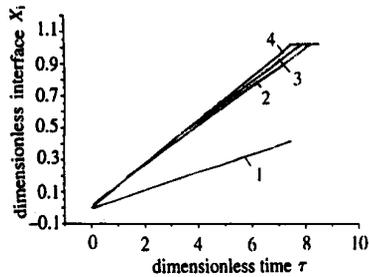


Fig. 5 Solid-liquid interface as a function of time with different absorption coefficients ($\epsilon = 5$)

在很薄的一层组织内就被吸收,相当于以第二类传热边界条件加热,此时的解冻过程也就接近于第二类边界条件加热时的解冻过程。

3 结论

对激光加热时冷冻生物组织内的解冻过程进行了数值模拟。其中,热传递采用固液相变传热方程予以描述,激光在组织内的吸收过程则采用 Beer 指数衰减模型加以近似。计算结果发现,虽然激光对生物组织的加热具有容积加热的特点,但以激光为热源时生物组织内的解冻过程仍然呈现出与普通热源加热时的解冻过程相似的规律。组织吸收系数对解冻过程影响较大。吸收系数越高,组织解冻过程越趋于普通热源加热时的解冻过程。

参考文献

- [1] Sagi A, Shitzer A. Opt Engng, 1992, 31(7): 1417 ~ 1423.
- [2] Glenn T N, Rastegar S, Jacques S L. IEEE Trans on Biomedical Engng, 1996, 43(1): 79 ~ 86.
- [3] Loze M K, Wright C D. Appl Opt, 1998, 37(23): 6822 ~ 6832.
- [4] 周建华, 刘登瀛, 徐建中. 激光生物学报, 2001, 10(4): 241 ~ 254.
- [5] Rabin Y, Shitzer A. ASME J Biomechanical Engng, 1997, 119: 146 ~ 152.
- [6] Date A W. International J Heat and Mass Transfer, 1991, 34(9): 2231 ~ 2235.
- [7] 周建华, 陈明勇, 陈钟硕. 计算物理, 1996, 13(4): 481 ~ 488.

(上接第467页)
B 值相同的情况下,如果其它条件不同,扰动的功率增益 G 是有差异的。

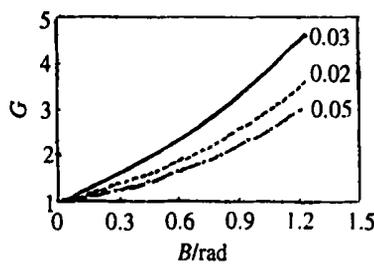


Fig. 4 Variation of the power gain of perturbation with B-integral in amplifying medium with different gain coefficient

3 结语

从分析可以看出, B 值相同的情况下,如果其它条件不同,扰动的功率增益

G 是有差异的,一定的 B 值下背景光强越强扰动的功率增益越小、介质增益系数越大扰动的功率增益也越大。文中给出了不同条件下 B 值与功率增益 G 的对应关系,可以较为直观地看到扰动的增长情况。

参考文献

- [1] Campillo A J, Shapiro S L, Suydam B R. A P L, 1973, 23: 628 ~ 630.
- [2] Bespalov V I, Tanlanov V I. Soviet Physics JETP Lett, 1966, 3: 307 ~ 310.
- [3] Aikens D, Roussel A, Bray M. SPIE, 1997, 2633: 350 ~ 360.