

·生物医学光子学·

表面照射下激光与生物组织的光热作用分析<sup>\* \*</sup>江世臣, 张学学<sup>\* \*</sup>

(清华大学热能工程系热动力工程与热科学重点实验室, 北京 100084)

**摘要:**建立了表面照射下激光与生物组织光热作用的二维变物性数学模型,采用 Monte Carlo 模拟方法数值求解了表面照射下组织内激光能量的分布,进而采用有限差分方法数值求解 Pennes 生物传热方程得到了组织内的温度分布。计算结果表明:假设组织热物性为常数,将高估组织的温升;假设激光能量在组织内按指数规律衰减,计算得到的光束范围内的组织温升高于采用 Monte Carlo 方法的模拟结果;在功率相同的情况下,光束半径越大,光束范围内组织的温升越小,径向温升区域越大。

**关键词:**光热作用; Monte Carlo 模拟; 激光能量传输; 生物传热; 变物性

**中图分类号:** R318.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2005)06-0752-05

### Optical-thermal Interaction of Biological Tissue Subjected to the Surface-applied Laser Irradiation

JIANG Shi-chen, ZHANG Xue-xue<sup>\* \*</sup>

(Key Laboratory of Thermal Science and Power Engineering, Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** A two-dimensional mathematical model was developed to simulate the photo-thermal interaction of biological tissue subjected to the surface-applied laser irradiation. Laser energy deposition in biological tissue was simulated using Monte Carlo method and temperature distributions in tissue were then numerically calculated using finite difference method based on the Pennes bioheat equation. The numerical results show that the temperature increase will be overestimated if thermal properties of tissue are assumed to be constant as most current researchers take. Moreover when laser energy deposition is assumed to be the specific exponential function temperature increase in tissue near the light spot was much higher than the corresponding value when Monte Carlo method was used to simulate laser energy transport. Under the same operating conditions that tissue temperature increase near light spot becomes smaller and influenced region where tissue temperature increased perceptibly becomes larger with the  $1/e^2$  radius of laser beam increased.

**Key words:** photo-thermal interaction; Monte Carlo simulation; laser transport; bioheat transfer; variable properties

## 1 引言

表面激光照射是激光医学临床广泛采用的一种

治疗手段。表面照射下,激光与生物组织的光热作用引起了研究者的关注<sup>[1]</sup>。谢树森等<sup>[2]</sup>近似地假设激光能量在组织中按指数规律衰减,基于 Pennes 生物

\* 收稿日期:2004-09-27 修订日期:2004-12-23

\* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(50276032)

\* \* Email: zhangxx@mail.tsinghua.edu.cn

传热方程建立了激光与皮肤层状组织光热作用的数学模型,计算了脉冲激光作用下组织内的温度分布。李小霞等<sup>[3]</sup>也假设激光能量在组织中按指数规律衰减,采用有限元法数值求解 Pennes 生物传热方程得到了平行光束照射下组织内的温度分布。Sturesson 等<sup>[4]</sup>采用 Monte Carlo 模拟得到了表面照射下组织内的激光能量分布,并基于 Pennes 生物传热方程计算得到了组织内的温度分布,但在模型中没有考虑组织物性的动态变化。

本文考虑组织热物性随温度的动态变化,采用 Monte Carlo 模拟方法数值求解了表面照射下组织内激光能量的分布,进而采用有限差分方法数值求解 Pennes 生物传热方程得到了组织内的温度分布,分析了假设激光能量在组织中按指数规律衰减计算得到的组织温升与采用 Monte Carlo 方法计算组织内激光能量分布结果的偏差。计算结果可为表面照射下的激光医疗提供理论依据。

## 2 理论模型

图 1 为表面激光照射下的生物组织示意图,计算采用二维圆柱坐标系  $roz$ ,坐标原点与组织表面处的光斑中心重合。

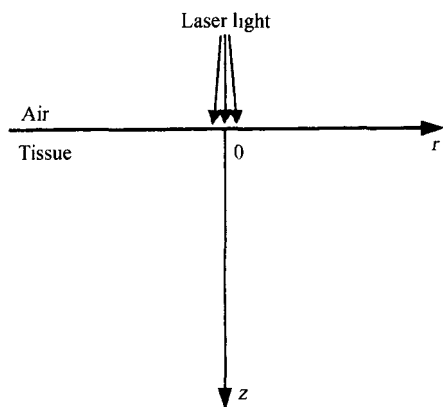


图 1 表面激光照射下的生物组织的示意图  
Fig.1 Schematic of biological tissue subjected to a surface-applied laser irradiation

激光在组织中的传输过程可由传输方程描述为<sup>[5]</sup>

$$\frac{dJ(r,s)}{ds} = -(\mu_a + \mu_s)J(r,s) + \frac{\mu_s}{4} p(s,s)J(r,s) \quad (1)$$

其中:  $J(r,s)$  为辐射强度,表示单位时间内通过垂直于  $s$  方向的单位投影面积的单位立体角的能量;  $\mu_a$ 、 $\mu_s$  分别为生物组织对入射激光的吸收系数和散射系数;

$d$  为  $s$  方向的微元立体角;  $p(s,s)$  为光子从方向  $s$  上单次散射到  $s$  上的相函数,通常采用 Henyey-Greenstein 函数。

方程(1)无论用分析法还是数值法都很难直接求解,常用的求解方法有 Monte Carlo 模拟方法、扩散近似(diffusion approximation)理论和 Kubelka-Munk 理论等。其中, Monte Carlo 模拟是目前应用较多的一种确定激光在组织中分布规律的数值求解方法,其基本思想是<sup>[5,6]</sup>:跟踪光子通过混沌介质时被吸收和散射的过程,通过对大量光子的统计平均得到激光能量在组织中的分布,具体步骤参照文献[6~8]。

求得组织吸收的激光能量的空间分布后,可根据二维圆柱坐标下的 Pennes 生物传热方程计算生物组织内的温度场<sup>[1,9]</sup>,即为

$$c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (kr \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (k \frac{\partial T}{\partial z}) + \omega_b c_b (T_b - T) + Q_m + Q_l \quad (2)$$

式中:  $T$ 、 $c$  和  $k$  分别为生物组织的温度、密度、比热和热导率;  $\omega_b$ 、 $c_b$  及  $T_b$  分别为动脉血的密度、比热和温度;  $\omega_b$  为血液灌注率;  $Q_m$  为代谢产热;  $Q_l$  为 Monte Carlo 模拟所得到的组织吸收的激光能量。

与方程(2)相应的初始条件和边界条件分别为

$$t = 0, T = T_0 \quad (3)$$

$$r = 0, \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (4)$$

$$r \rightarrow \infty, T = T_0 \quad (5)$$

$$z = 0, -k \frac{\partial T}{\partial z} = h(T_f - T) \quad (6)$$

$$z \rightarrow \infty, T = T_0 \quad (7)$$

式中:  $T_0$  为组织的初始温度,假设初始时刻组织内的温度均匀一致,计算中取 23 ;  $h$  为组织与环境间对流换热系数,计算中取为 5 W/m<sup>2</sup>·K;  $T_f$  为环境空气温度,取 23 。

对波长为 1064 nm 的激光照射下离体猪肝组织中的激光能量分布和温度分布进行了模拟计算。光学物性参数数据为<sup>[4]</sup>:吸收系数  $\mu_a = 0.5 \text{ cm}^{-1}$ ,散射系数  $\mu_s = 80.0 \text{ cm}^{-1}$ ,各向异性系数  $g = 0.97$  和折射率  $n = 1.38$ 。在激光照射过程中,组织的光学物性参数会发生变化,由于数据缺乏,假设离体猪肝组织的光学物性参数为常数。

在激光照射下,生物组织的热物性参数会发生变化,且规律复杂。根据文献[4]报道,选取生物组织的密度、比热和热导率随温度的变化关系式为

$$\rho(T) = 1000(1.3 - 0.3k w) \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (8)$$

$$c(T) = 4190(0.37 + 0.63k_c w) \quad (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (9)$$

$$k(T) = 0.419(0.133 + 1.36k_k w) \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (10)$$

其中:  $w$  为组织的含水率,对于肝组织约为 0.69;  $T$  为组织的温度;  $k$ 、 $k_c$  和  $k_k$  分别为密度、比热和热导率随温度变化的比例系,有

$$k = 1 - 4.98 \times 10^{-4} (T - 20) \quad (11)$$

$$k_c = 1 + 1.016 \times 10^{-4} (T - 20) \quad (12)$$

$$k_k = 1 + 1.78 \times 10^{-3} (T - 20) \quad (13)$$

### 3 计算结果与讨论

为了验证编写的 Monte Carlo 模拟程序及温度计算程序的正确性,计算了 1064 nm 的连续激光照射离体猪肝组织时组织内的温度分布,并与文献[4]进行了对比,如图 2 所示。计算参数采用文献[4]中的数据:激光功率为 1.6 W(组织表面附有塑料膜,透射比约为 0.94),入射光束为均匀分布光束,光束半径为  $r_1 = 10$  mm;组织的光学物性和热物性如前所述,不考虑激光与组织相互作用时组织物性的动态变化。由图可见,计算结果与文献[4]吻合很好。

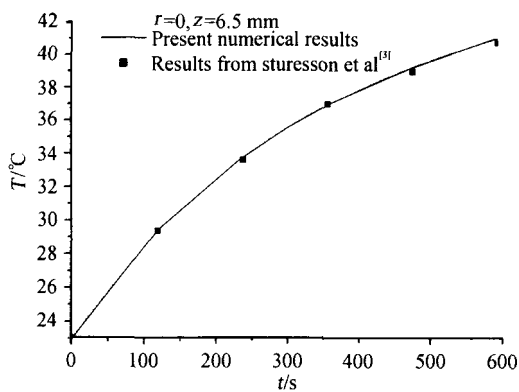


图 2 组织内 1 点的温度分布

Fig. 2 Temperature distribution at one specific point

为了分析组织热物性动态变化对生物组织内温度分布的影响,分别计算了功率为 2.0 W、3.0 W 和 4.0 W 时考虑组织热物性动态变化和假设组织热物性为常数的温度分布,如图 3 所示。计算中,假设入射光束为高斯光束,即光束截面上光电场振幅分布按照高斯函数规律从中心向外平滑地减小;界面处的光束半径(振幅减小到中心振幅  $1/e$  处的半径)为  $r_1 = 10$  mm。由图可见,如果假设组织的热物性为常数,计算得到的组织内的温度高于考虑组织热物性动态变化时的结果,即高估组织的温升。当激光光源的

率增大时,这种差别更明显。

$$Q_r(r, z) = \mu_{\text{eff}} \frac{2P}{r_1^2} \exp\left[-2\left(\frac{r}{r_1}\right)^2\right] \exp(-\mu_{\text{eff}} z) \quad (14)$$

其中:  $P$  为输出激光功率,  $\mu_{\text{eff}}$  为组织的衰减系数,  $\mu_{\text{eff}} = \sqrt{3\mu_a(\mu_a + \mu_s(1-g))}$ 。

图 4 分别示出了假设激光能量在组织内按式(14)示指数规律衰减和采用 Monte Carlo 方法计算组织内激光能量空间分布的温度分布。式(14)是作者类比纯吸收介质对表面高斯分布激光的吸收特点而提出的一种能量分布计算式,此式与其他计算式(如“光束加宽模型”)的比较将另行讨论。计算中,假设入射光束为高斯光束,界面处光束半径为  $r_1 = 10$

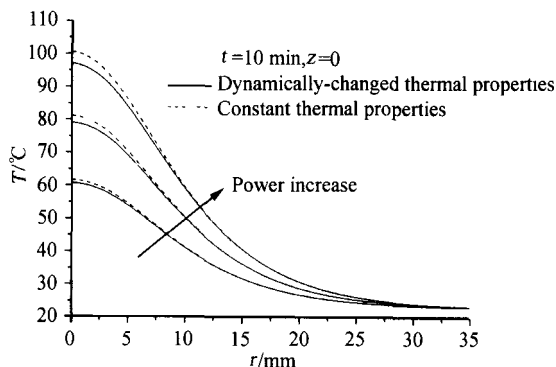


图 3(a) 不同功率下考虑热物性动态变化对组织受光表面温度沿径向距离变化的影响

Fig. 3(a) Effects of the dynamic changes in thermal properties on the temperature distribution in  $r$  direction at tissue surface for different laser powers

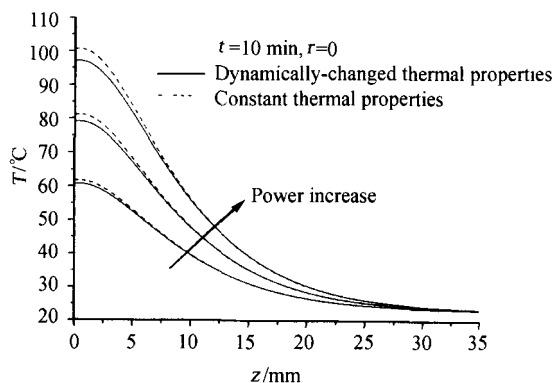


图 3(b) 不同功率下考虑热物性动态变化对组织内的温度沿轴向距离变化的影响

Fig. 3(b) Effects of the dynamic changes in thermal properties on the temperature distribution in  $z$  direction for different laser powers

mm,激光光源功率为  $P=2.0\text{ W}$ ,考虑组织热物性动态变化。可见,假设激光能量在组织内按指数规律衰减时所计算得到的光束范围内的组织温度将高于采用 Monte Carlo 方法时的温度。即使考虑组织表面处激光的漫反射(按照 Monte Carlo 模拟结果将漫反射的激光能量份额约 15.8%扣除),将组织吸收的激光能量假设成指数衰减形式时所计算得到的组织温度仍高于采用 Monte Carlo 方法时的温度。

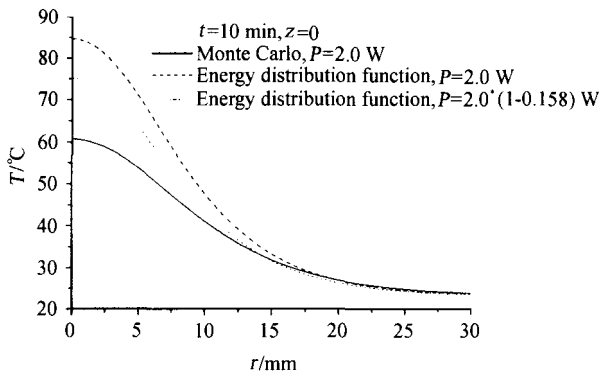


图 4(a) 不同能量计算方法对组织受光表面温度沿径向距离变化的影响

Fig. 4(a) Comparison of temperature distribution in  $r$  direction at tissue surface

为了分析光束半径对生物组织内温度分布的影响,分别计算了界面处光束半径为 5 mm、10 mm、15 mm 和 20 mm 下的温度分布,如图 5 所示。计算中,取光源功率为 1.6 W,并考虑组织热物性动态变化。可见,光束半径越大,光束范围内生物组织的温升越小,在半径方向上温度明显升高的区域越大。

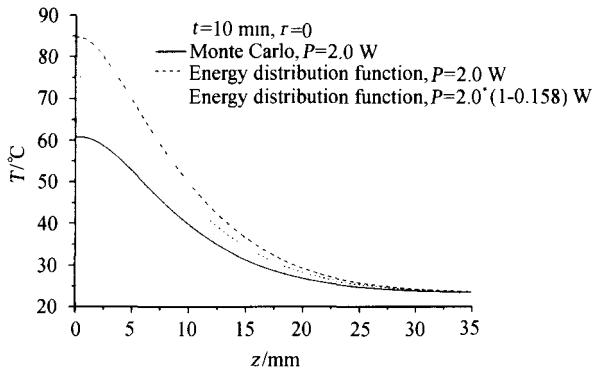


图 4(b) 不同能量计算方法对组织内的温度沿轴向距离变化的影响

Fig. 4(b) Comparison of temperature distribution in  $z$  direction between results

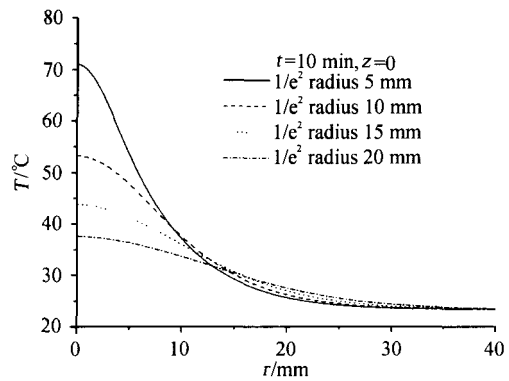


图 5(a) 不同光斑半径下组织受光表面的温度沿径向距离的变化

Fig. 5(a) Temperature distribution in  $r$  direction at tissue surface for different light spot radius

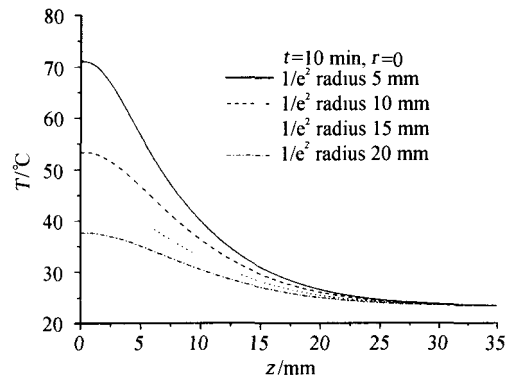


图 5(b) 不同光斑半径下组织内的温度沿轴向距离的变化

Fig. 5(b) Temperature distribution in  $z$  direction for different light spot radius

## 4 结论

采用 Monte Carlo 模拟方法数值求解了表面照射下组织内激光能量的分布,进而采用有限差分方法数值求解 Pennes 生物传热方程得到了组织内的温度分布,得到的主要结论为:

- 1) 研究表面照射下激光与生物组织的光热作用时,假设组织热物性为常数,将高估组织的温升,且激光光源的功率越大,所造成的偏差越大。
- 2) 假设激光能量在组织中按指数规律衰减时,所计算得到的光束范围内的组织温升将高于采用 Monte Carlo 方法时的模拟结果。
- 3) 光束半径越大,光束范围内生物组织的温升越小,在半径方向上温度明显升高的区域越大。

## 参考文献:

[1] ZHOU Jir-wei, YN Zhao-qin, XU Xu, et al. Heat Transfer

- mode for thermal interaction in biological tissue irradiated by high-power laser[J]. Optoelectronics · Laser(光电子·激光), 2004, **15**(9):1123-1127. (in Chinese)
- [2] XIE Shu-sen, YANG Hong-qin, LI Bu-hong. Optical-thermal interaction of laser-irradiated layered skin tissue and its heat transfer model[J]. Journal of Optoelectronics · Laser(光电子·激光), 2001, **12**(7):746-750. (in Chinese)
- [3] LI Xiao-xia, FAN Shi-fu, ZHAO You-quan, et al. FEM analysis of photo-thermal effect in PDT[J]. Journal of Optoelectronics · Laser(光电子·激光), 2004, **15**(7):881-884. (in Chinese)
- [4] Müller G, Roggan A. Laser-induced interstitial thermotherapy[M]. Bellingham, Washington: SPIE Optical Engineering Press, 1995. 83-189.
- [5] Niemz M H. Laser-Tissue Interactions: Fundamentals and Applications[M]. 2nd Rev edition. New York: Springer-Verlag, 2002.
- [6] Wang L H, Jacques S L, Zheng L Q. MCML—Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues[J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 1995, **47**:131-146.
- [7] MA Ning, LI He-jie, JIANG Shi-chen, et al. A two-layer biological model for laser-induced interstitial thermotherapy[J]. Chinese J Lasers(中国激光), 2003, **30**(4):380-384. (in Chinese)
- [8] Welch A J, van Gemert M J C. Optical-thermal response of laser-irradiated tissue[M]. New York: Plenum Press, 1995, 73-100.
- [9] Pennes H H. Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm[J]. Journal of Applied Physiology, 1948, **1**(2):93-122.
- 作者简介:  
江世臣 (1980 - ), 男, 博士研究生. 主要研究方向为生物传热学及其医学应用、激光与生物组织的相互作用及其医学应用.
- 
- (上接第 747 页)
- [10] MA H M, Gong S Q, Liu C P, et al. Effects of spontaneous emission-induced coherence on population inversion in a ladder-type atomic system[J]. Opt Commun, 2003, **223**(1):97-101.
- [11] LIU Cheng-pu, GONG Shang-qing, FAN Xi-jun, et al. Electromagnetically induced absorption via spontaneously generated coherence of a system[J]. Opt Commun, 2004, **231**:289-295.
- [12] FAN Xi-jun, LIU Cheng-pu, TIAN Shu-fen, et al. Destabilization of the nonlasing solution in open three-level systems[J]. J Modern Opt, 2003, **50**(11):1763-1772.
- [13] FAN Xi-jun, LI Ping, TIAN Shu-fen, et al. A nonlinear analytical and numerical study for an open system with coherent off-resonant fields[J]. Chin Physics, 2001, **10**(7):613-620.
- [14] LIU Cheng-pu, TIAN Shu-fen, XU Hui, et al. Discussion of the bifurcation inducing lasing without inversion on open V-system[J]. J of Optoelectronics · Laser(光电子·激光), 2002, **13**(10):1056-1061. (in Chinese)
- [15] FAN Xi-jun, LI Ping, WANG Yong. Time evolution of atomic response in an open V-type system with two-color pumps[J]. Journal of Optoelectronics · Laser(光电子·激光), 2002, **13**(8):842-847. (in Chinese)
- [16] FAN Xi-jun, XU Hui, TIAN Shu-fen. Transverse effect of field in an open V-type inversionless lasing system[J]. Journal of Optoelectronics · Laser(光电子·激光), 2003, **14**(11):1200-1204. (in Chinese)
- 作者简介:  
李景娟 (1980 - ), 女, 山东临沂市人, 硕士研究生, 主要从事量子光学方面的研究.