

文章编号: 0258-7025(2002)12-1127-06

激光照射下生物组织内的双曲型导热研究

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 以激光在生物医学中的应用为背景, 对激光照射下生物组织内的双曲型导热问题进行了研究。将激光传输的七流模型与圆柱坐标系内的二维双曲型导热模型相结合建立了理论模型; 将激光照射处理为容积吸收(即考虑激光在生物组织中的散射和吸收)所得到的计算结果, 与将激光照射处理为第二类传热边界条件所得到的计算结果相比, 两者差别很大; 考察了激光照射下散射系数和吸收系数对生物组织内双曲型导热的影响。

关键词 激光, 生物组织, 双曲型导热

中图分类号 TK 124; Q 631; R 318.51 文献标识码 A

Study on the Hyperbolic Heat Conduction in Laser Irradiated Biological Tissue

ZHOU Jian-hua, LIU Deng-ying, XU Jian-zhong, HUAI Xiu-lan

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

Abstract Considering the laser applications in biology and medicine as background, this paper presented a theoretical research on the hyperbolic heat conduction in laser irradiated tissue. A numerical model was established by combining the sevenflux model of light propagation with the two-dimensional hyperbolic heat conduction model in cylindrical coordinates. It showed that there exists a great discrepancy between the results obtained by treating the laser irradiation as volumetric absorption (i. e. taking laser scattering and absorption into consideration) and those obtained by treating the laser irradiation as the second boundary condition. The effects of the scattering and absorption coefficients of tissue on the hyperbolic heat conduction in laser irradiated tissue were discussed.

Key words laser, biological tissue, hyperbolic heat conduction

1 引 言

激光在生物医学中的应用已有 30 多年的历史^[1]。由于这些应用大部分与热效应有关, 因此吸引了不少工程热物理领域的专家也加入到这个研究行列中来^[2]。但由于组织光学的复杂性, 热物理研究人员在建立激光组织的热作用模型时, 常常将激光表面照射处理为第二类传热边界条件^[3]。这样做究竟符不符合实际情况呢?

激光与生物组织的热作用十分复杂。一般认为, 激光照射到生物组织表面后, 只有约百分之几的能量被表面反射回来, 剩下的大部分能量进入到生物组织内部进行传播^[4]。在传播过程中, 不断发生

散射和吸收。被吸收的能量转变为热能, 用于加热生物组织。所以激光照射生物组织时所生成的热能实际上遍布于生物组织的各个角落, 是一个容积吸收过程。所以将激光照射简单地处理为传热学第二类边界条件是不符合实际情况的。

本文将激光传输的七流模型与圆柱坐标系内的二维双曲型导热模型相结合, 对激光照射下生物组织内的双曲型导热问题进行了研究。通过比较发现, 激光照射处理为容积吸收后所得到的结果, 与将激光照射处理为第二类传热边界条件所得到的结果相比, 两者差别很大。最后, 作者还考察了组织散射系数和吸收系数对激光照射下组织内双曲型导热过

收稿日期: 2001-09-04; 收到修改稿日期: 2001-11-28

基金项目: 国家自然科学基金重点基金(59736130)和国家重点基础研究发展规划项目资金(G2000026305)资助项目。

作者简介: 周建华(1971—), 男, 中国科学院工程热物理研究所博士生, 主要从事激光生物学和超急速传热传质学的研究。

E-mail: zjhua@public.bta.net.cn

程的影响。

2 理论模型

2.1 激光传输模拟

激光在生物组织中发生的吸收和散射过程可由辐射传输方程^[5]进行描述

$$\begin{aligned} \hat{s} \cdot \nabla L(\mathbf{r}, \hat{s}) + \chi L(\mathbf{r}, \hat{s}) = \\ \frac{\chi}{4\pi} \int_{\pi} p(\hat{s}, \hat{s}') L(\mathbf{r}, \hat{s}') d\omega' \end{aligned} \quad (1)$$

式中, \mathbf{r} 为空间位置, \hat{s} 和 \hat{s}' 为方向矢量, $L(\mathbf{r}, \hat{s})$ 为位置 \mathbf{r} 处, \hat{s} 方向上的辐射强度, 单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$, ω' 为空间立体角, $p(\hat{s}, \hat{s}')$ 为相函数, 它满足如下关系式

$$\frac{1}{4\pi} \int_{\pi} p(\hat{s}, \hat{s}') d\omega' = \frac{\sigma}{\chi} \quad (2)$$

式中, χ 为衰减系数, 单位为 m^{-1} , 它等于散射系数 σ 和吸收系数 κ 之和。

方程(1)是一个复杂的积分微分方程, 要获得其分析解非常困难。人们一般借助于数值模拟。本文采用激光传输的七流模型^[6]来模拟激光在生物组织中的散射和吸收过程。该模型的可靠性已得到验证^[7]。在柱坐标系(物理模型见下文)中的具体求解过程参见文献[8]。

本文所采用的物理模型见图1。考虑从表面入射的激光束横截面呈圆形的情况, 建立了如图1所示的柱坐标系。

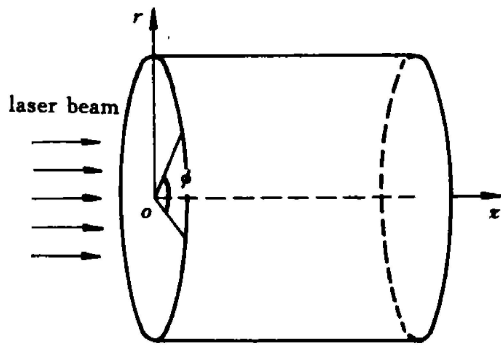


图1 物理模型

Fig. 1 Physical model

2.2 双曲型导热模拟

在一定条件下, 生物组织受外界热作用时组织内部温度并非随加热时间单调增加, 而是在一定范围内上下波动^[9]。针对这种温度振荡现象的理论解释已有很多。但到目前为止, 运用双曲型导热理论对这种现象作出的解释也许是最成功的^[10]。在这

种导热方式下, 热量表现出以有限速度和以波动方式传播的特点(这是区别于传统的傅里叶导热规律的一种非傅里叶导热特征)。

在图1所示的柱坐标系中, 双曲型导热方程的完整数学描述是(本文暂不考虑生物体中血液流动的影响)

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{1}{r} \left| \frac{\partial(r \cdot q_r)}{\partial r} + \frac{\partial(r \cdot q_z)}{\partial z} \right| + g \quad (3)$$

$$\tau \frac{\partial q_z}{\partial t} + q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (4)$$

$$\tau \frac{\partial q_r}{\partial t} + q_r = -k \frac{\partial T}{\partial r} \quad (5)$$

式中, ρ 为密度, 单位为 kg/m^3 ; c_p 为比热, 单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; T 为温度, 单位为 $^\circ\text{C}$; t 为时间, 单位为 s ; r 和 z 分别为径向坐标和轴向坐标, 单位均为 m ; q_r 和 q_z 分别为径向热流密度和轴向热流密度, 单位均为 W/m^2 ; g 为激光照射产生的内热源(激光在组织内的传播速度相对于热扩散速度而言非常快, 因此迄今为止大部分关于激光对生物组织热作用的文献都近似地认为激光在组织内的传播速度是无限大, 即直接将其考虑为热扩散方程中的一个源项), 单位为 W/m^3 ; k 为导热系数, 单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; τ 为热松弛时间, 单位为 s 。

到目前为止, 仅仅对于极少数简单几何和边界条件情形才能得到这种波动问题的分析解^[11], 因此人们更多的是借助于计算机数值模拟。正如前文所述, 由于双曲型导热方程具有波传播性质, 导致波前附近温度呈极陡的跳跃式分布, 因此即使是数值模拟也具有相当的难度。所以到目前为止, 这方面的工作仍集中于一维的处理^[12]。最近, 周建华等^[13]提出了柱坐标系中二维双曲型导热的高阶 TVD 格式, 得到了数值振荡极小的解。本文就采用文献[13]提出的计算模型模拟激光照射下组织内的双曲型导热过程。

3 结果与讨论

取生物组织的典型热物性数据如下^[14]: $\rho = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$, $k = 0.628 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$, $c_p = 4187 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。根据文献[15], τ 为 16 s。对某一波长的激光而言, 不同生物组织间的光学性质表现出很大的差异; 即使是同一生物组织, 若受到不同波长激光的照射, 其光学性质也不一样。Cheong 等^[16]以列表形式对不同波长激光照射下各种动物组织(包括人

体组织) 的光学参数进行了总结, 这里, 不妨取 Nd:YAG 激光(波长为 1.06 μm) 照射下狗胃的光学性质作为本文计算中需要用到的组织光学参数^[17], 即 $\sigma = 10.6 \text{ cm}^{-1}$, $\kappa = 0.4 \text{ cm}^{-1}$ 。

用功率密度为 3000 W/m^2 , 光斑半径为 2 mm (暂设激光束横断上的功率密度分布呈均匀分布)、照射时间为 5 s 的连续波(CW) 输出激光去照射直径为 10 mm, 厚度为 5 mm, 初始温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 的圆柱形生物组织。除照射表面外, 生物组织其他边界均绝热。

图 2 给出了将激光照射处理为容积吸收与将激光照射处理为第二类边界条件这两种方式下, 表面和背面温度随时间变化规律的比较。由图 2(b) 可见, 将激光照射处理为容积吸收(即考虑激光在组织内的散射和吸收) 时, 温度升高幅度非常小, 且表面和背面温度基本上同时升高, 没有体现出热量以有限速度传播的特点。相反, 如将激光照射处理为第二类边界条件(见图 2(a)), 会得到幅度很高的温升。在激光照射开始后, 表面温度迅速升高, 而物体背面温度直到一段时间后才开始升高, 很明显地表现出热量以有限速度传播的特点。因此, 将激光照射处理为第二类传热边界条件, 实际上夸大了生物组织中的非傅里叶导热特征。

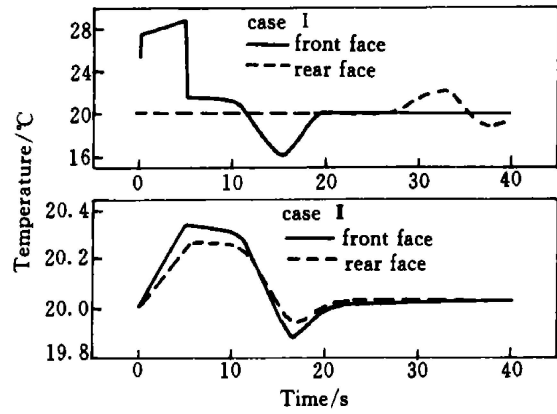


图 2 表面和背面温度随时间变化规律的比较
(a) 将激光照射处理为第二类传热边界条件;
(b) 将激光照射处理为容积吸收

Fig. 2 Comparison of temperature as a function of time
(a) treating laser irradiation as the second boundary condition;
(b) treating laser irradiation as volumetric absorption

图 3 给出了将激光照射处理为容积吸收时, 组织内温度分布随时间的变化。由图 3 看到, 在激光照射开始后, 迅速在组织内部建立起一个内热源分布。由于激光在生物组织中的散射主要呈前向散射, 侧向散射极少, 故激光在组织内的内热源分布主要还是局限于照射区域内, 导致照射开始阶段的温

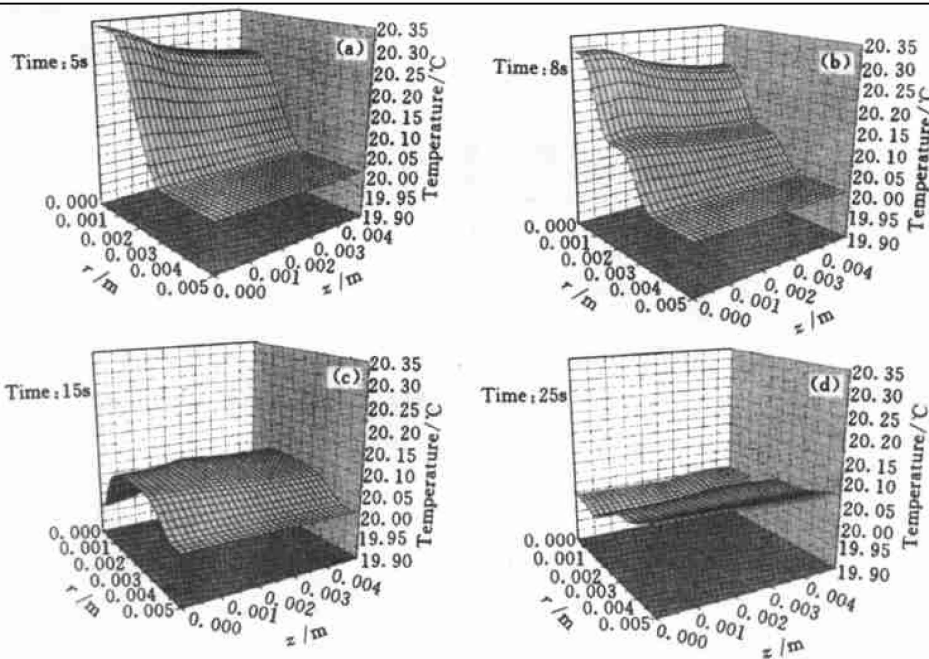


图 3 将激光照射处理为容积吸收时组织内部温度分布在第 5 s(a), 第 8 s(b), 第 15 s(c) 和第 25 s(d) 的变化
Fig. 3 Temperature distribution as a function of time with treating laser irradiation as volumetric absorption

升也主要体现在照射区域内, 在半径较大的区域, 温度基本上还没有开始升高(如图 3(a)), 表明在径向

方向热量的传播速度是有限的。随着时间的增长, 热量在径向方向以波动方式传播。看来, 在进行激

光照射下生物组织中非傅里叶导热的实验时,应主要考虑在径向方向布置温度测点,这样才更容易观察到热量以有限速度传播的非傅里叶导热特征。

图 4 给出了将激光照射处理为传热学第二类边界条件时组织内部温度分布随时间的变化情况。由图 4 可见,当将激光照射处理为第二类传热边界条件时,最早开始的温升也主要体现在照射表面处,而在远离照射表面(无论径向还是轴向)的区域,温度仍然保持在初温。这表明,无论在径向还是轴向,热量都是以有限速度传播的。波前的形状呈曲线,表明热波在组织内是传向四面八方的。

由前面的讨论看到,将激光照射处理为容积吸收所得到的计算结果,与传统上将激光照射处理为

第二类传热边界条件所得到的计算结果相比,两者差别很大。激光在生物组织中的散射和吸收是一个很复杂的过程,主要与生物组织的两个重要光学参数(吸收系数和散射系数)有关。因此吸收系数和散射系数不同,生物组织对激光的容积吸收肯定会表现出不一样的特征。

图 5 给出了散射系数增大为 60.9 cm^{-1} 时,生物组织内的二维温度分布。由图可见,在激光照射刚刚结束时(图 5(a)),在轴向方向远离照射点处的温度升高不如散射系数较小(图 3(a))的情形,而在径向方向上远离照射点处有较明显的温升(相对于图 3)。激光照射结束后(图 5(b)),生物组织中的双曲型导热特征与散射系数较小的情形区别不大。

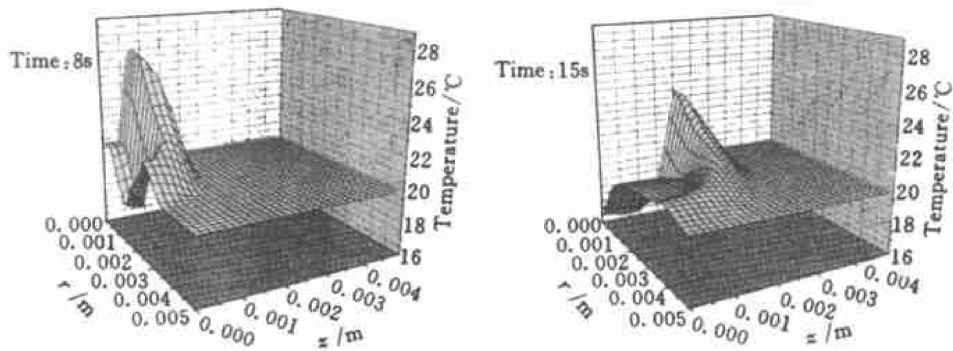


图 4 将激光照射处理为传热学第二类边界条件时组织内部温度分布随时间的变化

Fig. 4 Temperature distribution as a function of time with treating laser irradiation as the second boundary condition

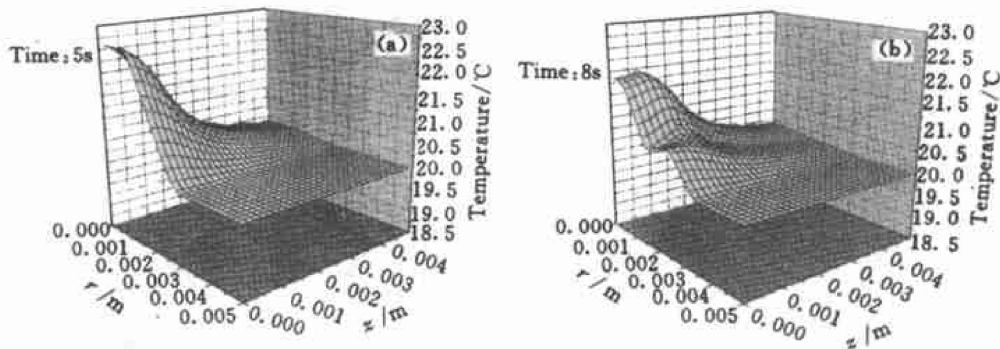


图 5 散射系数增大时组织内部温度分布在第 5 s(a) 和第 8 s(b) 时的变化

Fig. 5 Effect of scattering coefficient on temperature distribution in the tissue at 5 s (a) and 8 s (b)

图 6 给出了吸收系数增大为 5.9 cm^{-1} 时,生物组织内的二维温度分布图。通过与前面图 3(吸收系数为 0.4 cm^{-1}) 的对比发现,两幅图中各时刻下温度分布的差别很大。具体地说,吸收系数增大后,温度的变化更接近于图 4,即具有温升幅度大、热量传递的波动性质更明显的特点。由此可见,当吸收系数增大时,将激光照射处理为第二类边界条件所带来的误差越小。

采用 CO_2 激光(波长为 $10.6 \mu\text{m}$) 照射皮肤就是

一个典型例子。 CO_2 激光对皮肤的穿透深度只有约 $200 \mu\text{m}$ 左右^[18],用功率密度为 $1.0 \times 10^5 \text{ W/m}^2$,脉冲持续时间为 0.01 s ,光斑半径为 2 mm 的 CO_2 激光去照射皮肤组织。由于皮肤对 CO_2 激光的吸收系数很高,因此散射效应可忽略。人体皮肤的热物性参数取自文献[10]。由图 7 可见,当吸收系数大到 1500 cm^{-1} 时,按容积吸收计算得到的表面温度变化规律就很接近按第二类边界条件计算得到的结

果了。因此,人们在分析 CO_2 激光对皮肤的热作用时,按第二类传热边界条件处理就能得到比较满意的结果^[19]。当然,研究激光对皮肤的热作用时需要考虑的因素还有很多。皮肤本身由多层组织构成,

在每一层中都有不同的细胞。Welch^[20] 曾将皮肤划分成表皮、真皮和脂肪三层(每一层采用不同的热物理和光学性质),模拟了激光对组织的热作用,为我们下一步更深入的工作提供了思路。

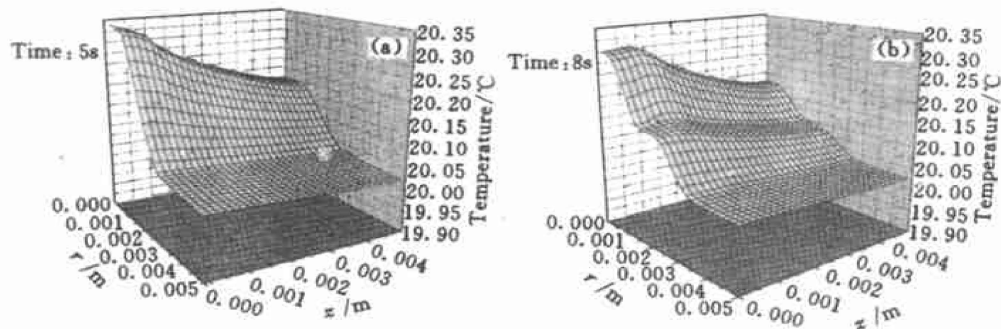


图 6 吸收系数增大时组织内部温度分布在第 5 s (a) 和第 8 s (b) 时的变化

Fig. 6 Effect of absorption coefficient on temperature distribution in the tissue at 5 s (a) and 8 s (b)

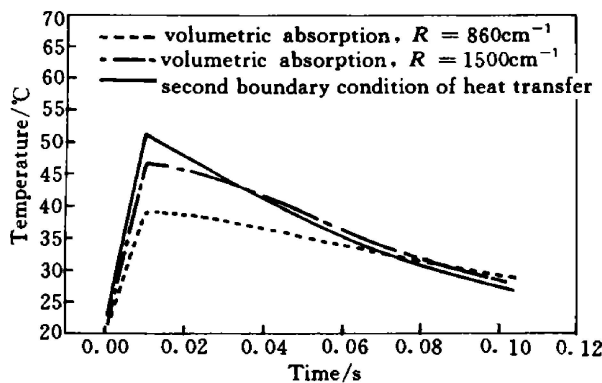


图 7 CO_2 激光照射皮肤组织时可近似按第二类边界条件处理

Fig. 7 Second boundary condition is a good approximation when the skin is irradiated by CO_2 laser

4 结 论

本文将激光传输的七流模型与圆柱坐标系内的二维双曲型导热模型相结合,对激光照射下生物组织内的双曲型导热问题进行了研究,得到如下结论:

1) 将激光照射处理为容积吸收后,热量以有限速度传播的非傅里叶导热特征不太明显。而将激光照射处理为第二类传热边界条件后,由于忽略了激光在生物组织中的快速传播(相对于热扩散速度而言),因而会过分夸大生物组织中的非傅里叶导热特征。

2) 由于激光在生物组织中的散射主要呈前向散射,侧向散射较少,在进行激光照射下生物组织中非傅里叶导热实验时,应主要考虑在径向方向布置

温度测点,才更容易观察到热量以有限速度传播的非傅里叶导热特征。

3) 散射系数主要对照射期间组织内的激光能量分布有一定影响,而对照射结束后的双曲型导热过程本身影响不大。相对而言,吸收系数对生物组织内的双曲型导热的影响更大。吸收系数越大,热量传递的波动特征越明显,将激光照射处理为第二类传热边界条件所带来的误差越小。

参 考 文 献

- 1 Li Junheng, Liang Hong. Laser Medicine-Laser Applications in Biology and Medicine [M]. Beijing: Science Press, 1989
- 2 Wang Cuncheng, Chen Huaqing. Thermophysics in Biology and Medicine [M]. Beijing: Science Press, 1994
- 3 Cui Xiaoming. Study on the Conduction and Vaporization in Porous and Biological Materials Induced by Pulsed Heat Flux [D]. Master's thesis, Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, The Chinese Academy of Sciences, 2000
- 4 A. J. Welch. The thermal response of laser irradiated tissue [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1984, **QE-20** (12): 1471~ 1481
- 5 A. Ishimaru. Wave Propagation and Scattering in Random Media [M]. New York: Academic, 1978
- 6 G. Yoon, A. J. Welch, M. Motamedi *et al.*. Development and application of three-dimensional light distribution model for laser irradiated tissue [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1987, **QE-23** (10): 1721~ 1732
- 7 L. B. Director, S. E. Frid, V. Y. Mendelev *et al.*. Computer simulation of heat and mass transfer in tissue during high-intensity long-range laser irradiation [C]. *Annals New York Academy of Sciences*, 1998. 56~ 65
- 8 Zhou Jianhua, Liu Dengying, Xu Jianzhong. Theoretical

- study on low invasive laser coagulation method [J]. *Acta Laser Biology Sinica* (激光生物学报), 2001, **10**(4): 241~254 (in Chinese)
- 9 Wang Yanming. Fundamental Study on the Thermophysics in Hyperthermia Therapy for Cancer, Ph. D. Dissertation [D]. Beijing: Tsinghua University, 1994
 - 10 Liu Jing, Wang Cuncheng. Bioheat Transfer [M]. Beijing: Science Press, 1997
 - 11 Zhang Zhe, Liu Dengying. Hyperbolic heat propagation in a spherical medium under extremely high heating rates [C]. Proceedings of the 7th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, ASME HTD 357-3, Albuquerque, NM, USA, June 15~18, pp. 275~283, 1998
 - 12 Jiang Fangming, Liu Dengying. Hyperbolic heat conduction restricted by continuous boundary interface [J]. *Progress in Natural Science*, 2001, **11**(4): 294~300
 - 13 Zhou Jianhua, Liu Dengying, Xu Jianzhong *et al.*. Numerical simulation on two-dimensional hyperbolic heat conduction in cylindrical coordinates [J]. *Progress in Natural Science*, 2002, **12**(5): 529~532
 - 14 Y. Yamada, T. Tien, M. Ohta *et al.*. Theoretical analysis of temperature variation of biological tissues irradiated by light [C]. ASME/JSME Thermal Engineering Conference, 1995, **Vol. 4**: 575~581
 - 15 K. Mitra, S. Kumar, A. Vedavarz *et al.*. Experimental evidence of hyperbolic heat conduction in processed meat [J]. *ASME J. Heat Transfer*, 1995, **117**: 568~573
 - 16 W. F. Cheong, S. A. Prahl, A. J. Welch. A review of the optical properties of biological tissues [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1990, **26**(12): 2166~2185
 - 17 C. M. Beacco, S. R. Mordon, *et al.*. Development and experimental in vivo evaluation of mathematical modeling of coagulation by laser [C]. *SPIE Laser Tissue Interaction* ④ 1992, **1646**: 138~149
 - 18 Wei Xuan *et al.*. Laser Applications in Medicine [M]. Beijing: Science Press, 1979
 - 19 A. L. McKenzie. Physics of thermal processes in laser-tissue interaction [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 1990, **35**(9): 1175~1209
 - 20 A. J. Welch. Laser irradiation of tissue, in Heat Transfer in Medicine and Biology—Analysis and Applications (edited by A. Shitzer, R. C. Eberhart) [M]. New York: Plenum Press, 1985, Vol. 2, 135~184

敬 告 读 者

经有关部门批准,从2003年起,《中国激光》B卷(*Chinese Journal of Lasers B*)将改刊名为*Chinese Optics Letters*,因此,*Chinese Journal of Lasers B*将从2003年起停刊,特此通知。

11年来,*Chinese Journal of Lasers B*得到了广大作者、审稿者和读者的支持、关心和帮助,编辑部全体工作人员对此表示衷心的感谢,并希望你们以更大的热忱,支持、关心和帮助*Chinese Optics Letters*的诞生、发展和延续,使*Chinese Optics Letters*走上更高的台阶。

谢谢!

《中国激光》编辑部

2002年12月