

文章编号: 1001-3806(2008)05-0542-03

## 激光辐照皮肤组织的热效应解析计算研究

唐 芳<sup>1</sup>, 牛燕雄<sup>1,2\*</sup>, 张 雏<sup>1</sup>, 陈 燕<sup>1</sup>, 姜 楠<sup>1</sup>, 杨海林<sup>1</sup>

(1. 军械工程学院 光学与电子工程系, 石家庄 050003; 2. 清华大学 精密仪器与机械学系 精密仪器测试技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 为了研究工作波段在近红外的激光安全问题, 建立了连续激光辐照生物组织的热学模型, 通过分离变量法求解热传导方程, 得出了生物组织在激光辐照阶段和扩散阶段皮肤组织瞬态温度分布的精确解析解, 并以氧碘激光辐照皮肤组织为例, 计算了皮肤组织在激光辐照下的温度场分布。结果表明, 皮肤组织温升随激光辐照时间和功率密度的增加而增加, 辐照结束后, 皮肤表面温度缓慢下降, 深处温度先缓慢上升, 再缓慢下降。分析结论与相关实验结果取得一致, 证实了所建模型的合理性。该结论对于其它连续激光对物质的热损伤研究是有帮助的。

**关键词:** 激光物理; 温度分布; 解析计算; 皮肤组织

**中图分类号:** Q682 **文献标识码:** A

### Calculation of thermal effect in skin-tissue induced by laser

TANG Fang<sup>1</sup>, NIU Yan-xiong<sup>1,2</sup>, ZHANG Chu<sup>1</sup>, CHEN Yan<sup>1</sup>, JIANG Nan<sup>1</sup>, YANG Hai-lin<sup>1</sup>

(1. Department of Optics & Electron Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China; 2. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In order to study near-infrared laser safety problem, the thermal model of biological tissue induced by continuous lasers was set up and the precise expression of transient temperature distribution induced by laser both in irradiation and diffusion process was obtained through discrete variable method. Taking skin tissue irradiated by chemical oxygen-iodine laser as an example, the skin temperature distribution was calculated and analyzed. The calculation showed that temperature increased with the power density and irradiation time, temperature of biological tissue subjected to the surface decreased slowly when the irradiation ended, but the temperature in the deep biological tissue increased at first and then decreased slowly. The analyzing result is in accordance with the relative experimental result, which proves the laser irradiation model correct. The result is helpful to the research of thermal damage induced by continuous laser in material.

**Key words:** laser physics; temperature distribution; resolution calculation; skin-tissue

## 引 言

高能激光武器一直被视为是激光军事应用的研究重点, 世界各军事强国对其发展都投入了大量的人力、物力和财力。激光器的输出波长逐步从长波长向短波长发展<sup>[1]</sup>。特别是氧碘激光器, 可以实现高功率长时间连续输出, 具有极好的光束质量, 自上世纪 80 年代研制出至今, 受到格外关注。高能激光武器系统不仅用于攻击光电探测、跟踪系统和人眼, 对人体皮肤也会造成一定损伤, 因此, 积极研究激光与皮肤组织的相互作用具有重要军事意义。目前国内外开展了大量激光

辐照生物组织的理论分析和实验研究工作<sup>[2-6]</sup>, 但都是立足于激光医学治疗, 氧碘激光对皮肤组织的损伤研究未见报道。

作者从激光辐照皮肤组织的热模型入手, 通过求解热传导方程, 求得了激光辐照阶段和热扩散阶段温度场分布的精确解析解, 在此基础上以 1.315 $\mu\text{m}$  的氧碘激光辐照皮肤组织为例, 进行了数值分析。

## 1 理论模型

假定在空气中, 一连续激光沿着生物组织垂直入射, 组织吸收激光光子的能量后, 使得组织分子的振动加快, 光能转化为组织的热能, 宏观上表现为组织温度的升高<sup>[7]</sup>。由于生物组织导热系数极小并且生物体的导热主要依靠温差传递, 生物导热实际上主要发生在光轴方向, 建立激光与生物组织相互作用模型如图 1 所示。

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (20060400418)

作者简介: 唐 芳 (1983-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为激光与生物组织的相互作用。

\* 通讯联系人。E-mail: niuyanxiong@263.net

收稿日期: 2007-06-06; 收到修改稿日期: 2007-07-25

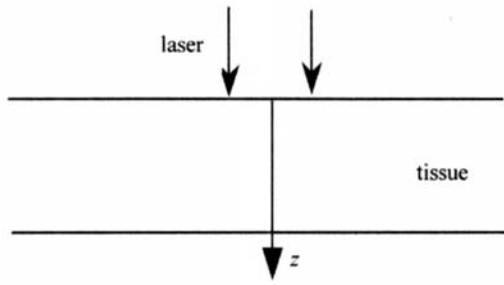


Fig 1 Physical model of biological tissue irradiated by laser

### 1.1 辐照阶段

直角坐标系下建立激光辐照皮肤组织热传导方程为：

$$\rho c \frac{\partial T_1}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} + Q_r \quad (1)$$

式中,  $T_1(z, t)$  为组织温度分布,  $z$  表距离,  $t$  表时间,  $\rho$  为皮肤组织的密度,  $c$  为比热容,  $\kappa$  为导热系数,  $Q_r$  为激光热源：

$$Q_r = - \frac{dI}{dz} = \mu_a I_0 \exp(-\mu_a z) \quad (2)$$

式中,  $\mu_a$  为皮肤组织对激光的吸收系数,  $I_0$  为照射界面  $z=0$  处的激光功率密度。

方程的初始条件为：

$$T_1(z, t)|_{t=0} = T_0 \quad (3)$$

式中,  $T_0$  为辐照前皮肤组织的初始温度, 是正常人体体温, 取为  $37^\circ\text{C}$ 。

由 (1) 式 ~ (3) 式进一步计算得：

$$T_1(z, t) = T_0 + \frac{I_0 \exp(-\mu_a z)}{\kappa \mu_a} \left[ \exp\left(\frac{\kappa \mu_a^2}{\rho c} t\right) - 1 \right] \quad (4)$$

### 1.2 扩散阶段

热传导方程为：

$$\rho c \frac{\partial T_2}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \quad (5)$$

由于环境热交换的作用非常小, 来自环境的热通常可以忽略, 边界条件和初始条件为：

$$\begin{cases} \frac{\partial T_2}{\partial z} = 0 \\ T_2(z, t)|_{t=0} = T_1(z, t_0) \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $t_0$  为激光辐照时间。通过分离变量法<sup>[8]</sup>对 (5) 式 ~ (6) 式进行求解：

$$T_2(z, t) = Z(z) \cdot \Gamma(t) \quad (7)$$

对方程式进行分离, 得到函数  $\Gamma(t)$  的解：

$$\Gamma(t) = \exp\left[-\frac{\kappa}{\rho c} \cdot \beta^2 \cdot t\right] \quad (8)$$

式中,  $\beta$  为分离常数, 空间变量函数  $Z(\beta, z)$  满足下列条件：

$$\begin{cases} \frac{d^2 Z(z)}{dz^2} + \beta^2 \cdot Z(z) = 0 \\ \frac{dZ(z)}{dz} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$T_2(z, t) = \int_0^\infty \exp\left[-\frac{\kappa}{\rho c} \cdot \beta^2 \cdot t\right] \cdot \frac{1}{N(\beta)} \cdot Z(\beta, z) \times \int_0^\infty Z(\beta, z') \cdot T_1(z', t_0) dz' d\beta \quad (10)$$

根据边界条件：

$$\begin{cases} Z(\beta, z) = \cos \beta \cdot z \\ N(\beta) = \frac{2}{\pi} \end{cases} \quad (11)$$

进一步计算得：

$$T_2(z, t) = \frac{1}{2} \frac{I_0}{\kappa \mu_a} \exp\left[\frac{\kappa \mu_a^2}{\rho c} \cdot t_0 - 1\right] \exp\left[\frac{\mu_a^2 \cdot \kappa}{\rho c} \cdot t\right] \cdot \exp(-\mu_a z) \cdot \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{\frac{\kappa}{\rho c} t}} + \frac{\mu_a}{2} \sqrt{\frac{\kappa}{\rho c} t}\right)\right] + T_0 \quad (12)$$

## 2 数值分析

### 2.1 生物组织的光热学参量

根据以上分析, 对氧碘激光辐照皮肤组织进行研究。皮肤组织的热学参量与组织含水量  $w$  之间有如下关系：

$$\begin{cases} \rho = (1.3 - 0.3w) \times 10^3 \\ c = (1.55 + 2800w/\rho) \times 10^3 \\ \kappa = (0.06 + 570w/\rho) \end{cases} \quad (13)$$

$\lambda = 1315\text{nm}$  时, 生物组织的其它光热学参量如表 1 所示。

Table 1 The physical parameters of skin tissue

water content $w$	0.5
density $\rho$	$1150\text{kg}/\text{m}^3$
thermal conductivity $\kappa$	$0.31\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
specific heat $c$	$2767\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
absorption coefficient $\mu_a^{[5]}$	$1.19\text{cm}^{-1}$

### 2.2 皮肤组织温度场分布

激光辐照功率密度  $I_0 = 0.5\text{W}/\text{cm}^2$  时, 10s 内, 在  $z=0\text{cm}$ ,  $z=0.2\text{cm}$ ,  $z=0.6\text{cm}$  处, 皮肤组织温度分布如图 2 所示。由计算结果可以看出, 皮肤组织的温度变化随辐照时间增加呈指数增加趋势, 随作用深度呈递减趋势, 随辐照时间增加, 不同深度处温差变化增大。辐照 10s 后,  $z=0\text{cm}$ ,  $z=0.2\text{cm}$ ,  $z=0.6\text{cm}$  处温度分别为

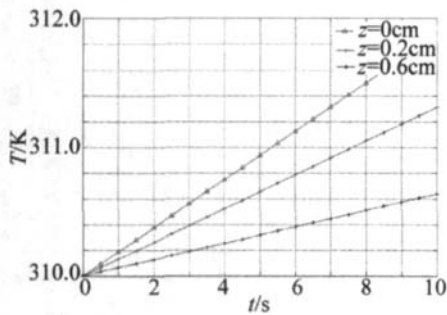


Fig 2 Temperature distribution on the condition of different depth

311.9K, 311.3K, 310.6K。  $z=0\text{cm}$  处温升最大, 内部温度变化不明显, 说明皮肤组织是热的不良导体;  $z=0.6\text{cm}$  处温度变化已不明显, 与皮肤组织热穿透深度  $Z_{\text{thcm}}(t) = 4\kappa t/\rho c = 0.624\text{cm}^{[7]}$  取得一致。

激光辐照功率密度分别为  $I_0 = 0.5\text{W}/\text{cm}^2$ ,  $1.0\text{W}/\text{cm}^2$ ,  $1.5\text{W}/\text{cm}^2$  时, 10s内, 在  $z=0\text{cm}$  处, 温度的分布如图 3 所示。辐照时间 10s后, 表面处最高温度分别为

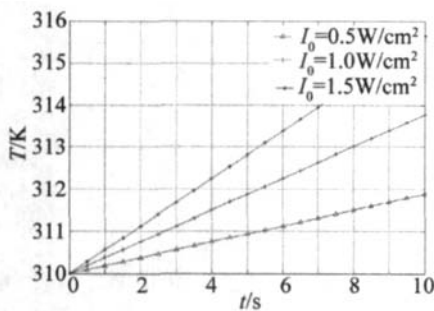


Fig 3 Temperature distribution on the condition of different power density 315.7K, 313.8K, 311.9K, 随激光辐照功率密度的增加, 皮肤组织温度变化逐渐增大。

激光辐照功率密度  $I_0 = 0.5\text{W}/\text{cm}^2$  时, 10s内, 在  $z=0\text{cm}$ ,  $z=0.15\text{cm}$ ,  $z=0.2\text{cm}$  处, 皮肤组织温度分布如图 4 所示。由图 4 可知, 激光辐照结束后, 表面温度

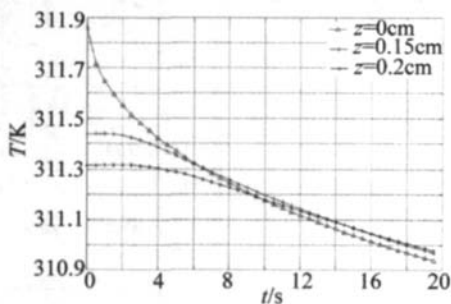


Fig 4 Temperature distribution on the condition of different depth in heat diffusion process

缓慢下降, 而皮肤组织内部温度先缓慢上升, 然后下降, 这是由于热扩散在皮肤组织内还需要一定时间, 沉

积热量使内部温度有一个上升过程; 内部温度较表面变化更为缓慢, 随着时间的延长, 皮肤内部与表面温度趋同, 直至人体正常体温, 这一过程需要时间 20s, 为组织热松弛时间, 与相关结论取得一致<sup>[9-10]</sup>, 说明了建模分析的有效性。

### 3 结论

利用分离变量的方法求得了皮肤组织在有限平顶分布连续激光辐照下, 辐照阶段和扩散阶段温度场分布的瞬态解析解, 并以氧碘激光为例进行了计算和数值模拟。研究表明, 皮肤组织温升随激光辐照时间和功率密度的增加而增加, 辐照结束后, 皮肤表面温度缓慢下降, 深处温度先缓慢上升, 再缓慢下降。分析结论与相关实验结果取得一致, 证实了所建模型的有效性, 同时本文中所得出的激光辐照皮肤组织在辐照阶段和扩散阶段的热效应解析解对其它连续激光对物质的损伤研究具有一定的参考价值。

### 参考文献

- [1] SU Y, WAN M. High energy laser system [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004: 5-9 (in Chinese).
- [2] LU L, LI ZH J. Theoretical investigation of opto-thermal transfer in human dentine irradiated by Nd:YAG laser [J]. Laser Technology, 2006, 30(4): 373-376 (in Chinese).
- [3] WEI H J, HE B H, CHEN X M, *et al* Pathological changes and thermal coagulation of human liver tissue induced changes in the optical penetration depths in vitro [J]. Laser Technology, 2007, 31(1): 31-34 (in Chinese).
- [4] THOMSEN B S L, THOMAS R J, WELCH A J. Modeling thermal damage in skin from 2000nm laser irradiation [J]. Journal of Biomedical Optics, 2006, 11(6): 064028/1-064028/15.
- [5] CAN C P, POLHAMUS G D, ROACH W P, *et al* Porcine skin visible lesion thresholds for near-infrared lasers including modeling at two pulse durations and spot sizes [J]. Journal of Biomedical Optics, 2006, 11(4): 041109/1-041109/10.
- [6] WEI H J, XING D, LU J J, *et al* Total attenuation coefficients of human bladder at different lasers measured by using the direct and indirect methods in vitro [J]. Laser Technology, 2005, 29(4): 420-422 (in Chinese).
- [7] NIEMZ M H. Laser-tissue interactions fundamentals and applications [M]. Beijing: Science Press, 2005: 53-61 (in Chinese).
- [8] YU Ch M. Heat conduction [M]. Beijing: Higher Education Press, 1984: 40-45 (in Chinese).
- [9] LU J, WANG C Ch. Heat conduction theory of biological tissue [M]. Beijing: Science Press, 1997: 232-340 (in Chinese).
- [10] SHEN G P, XIE Sh S. Theoretical analysis and numerical simulation of temperature distribution for laser-irradiated skin tissue [J]. Journal of Fujian Teachers University (Natural Science), 2002, 18(4): 26-29 (in Chinese).