

基于有限元方法的角膜组织热分析研究

杨艳芳 张 博 刘文陆 陈定方

(武汉理工大学智能制造与控制研究所 湖北 武汉 430063)

摘要: 生物医学与虚拟现实技术、计算机仿真技术的结合是现代科学技术的一个重要发展趋势。为了解决角膜热成形术中的预测性及可控制性问题,本文针对角膜的特性进行医学虚拟研究,分析其变形机理;利用有限元方法,模拟了激光作用于眼角膜时的温度场分布情况,给出了不同参数下的激光作用时角膜的温度场分布曲线和穿透深度的比较;仿真结果表明,激光能量对角膜组织穿透深度影响很大,为角膜热成形术的研究提供了定性的基础,在减少实验费用、提高手术的预测性方面有非常重要的价值。

关键词: 激光角膜热成形;有限元方法;瞬态温度场;虚拟分析

Study on heat analysis of cornea based on Finite element method

YANG Yan-fang, ZHANG Bo, LIU Wen-lu, CHEN Ding-fang

The Research Institute of Intelligent Manufacture and Control, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China

ABSTRACT: The combination of biomedicine with virtual reality and computer simulation is an important development trend. To improve the prognostication and controllability in laser thermokeratoplasty, in this paper, the characteristic of cornea was made medicine virtual study and the mechanism of distortion was analysed. Finite element methods were used to simulate the distribution of temperature field when laser acting on cornea presenting the distribution curve of temperature field and the comparing penetration depth when laser acting on cornea with different parameters. The result indicates that the penetration depth of cornea organization can be remarkably effected by laser energy, which provides the qualitative foundation for study on laser thermokeratoplasty and is valuable in reducing experimental expenses and improving controllability.

Key word: Laser thermokeratoplasty; Finite element methods; Transient temperature field Virtual Analysis

1 引言

近年来,眼科手术中用于矫正眼睛屈光不正(近视、远视和散光)的各种屈光手术得到广泛的研究和长足的发展。在治疗近视方面,运用准分子激光(PRK、LASIK等)治疗眼屈光不正已得到了广泛的认同,并且手术也具有较高的安全性和有效性^[1];在远视的矫正方面,由于非消融区域过小将会引起夜晕和眩晕问题,准分子激光应用不是很广泛。

角膜热成形术是屈光不正矫正领域的临析分支,主要用于远视的矫正^[1]。近年来激光角膜热成形术由于其非接触型和角膜非损伤性,得到广泛关注和研究。另外,由于年龄的增长引起的生理屈光减弱导致的老视也可以通过激光角膜热成形术得到较好的矫正,这大大拓宽了激光角膜热成形术的应用领域,也让人们看到激光角膜热成形术的广阔应用前景。

激光角膜热成形术的原理是:一定能量的激光照射的角膜上,使角膜内的胶原质内层温度升高,使胶原质失去一部分组织水,导致部分胶原质纤维凝固收缩,使胶原质纤维变短,并形成紧缩的带状,这条带状的绷紧线使得角膜中心突起,角膜曲率变小,从而提高了角膜的折射效率。目前,激光角膜热成形术存在的主要问题是对手术参数的控制与手术后曲率改变的预测,即手术参数(比如:激光能量、工作时间、光凝区直

径及光凝点数等)与角膜曲率改变的关系及参数的优化问题。

基于有限元方法的激光角膜热成形术的虚拟分析主要分为两步:(1)一定波长的激光作用在角膜上,使角膜组织温度升高,此时对角膜组织进行瞬态温度场分析;(2)激光照射一定的时间后,组织失去一部分水,使胶原纤维收缩,产生一定的拉应力,对此,我们对角膜组织进行非线性的应力变形分析。

在本文的研究中,采用有限元方法,研究了半导体激光作为表面热源作用于角膜时,材料的热物理参数不随温度变化的情况下,在角膜上所产生的瞬态温度场,以及不同能量的激光作用下温度场的分布比较。

2 角膜组织的生物力学特性及热参数

尽管对角膜活体组织的生物力学特性尚不很清楚,但综合各种实验结果,角膜组织通常表现为:

(1)非线性:通过单向拉伸实验,角膜软组织表现出非线性的应力—应变关系。

(2)粘弹性:当对软组织实施循环加载的时候,应力—应变曲线产生两条不同的路径分别对应加载和卸载的过程。

(3)其他的性质:由于其中水的含量较高,它们往往被假设为不可压缩的材料。

杨艳芳,(1975—),女,汉族,河北保定,博士研究生,主要研究方向:虚拟设计,计算机仿真及生物工程。

(收稿日期:2006-03-20 接受日期:2006-04-08)

由试验研究证明^[1, 2, 3, 5], 角膜虽然不是各向同性材料, 但是在拉伸等力学试验中, 它在各个方向所表现的性能基本保持一致, 因此可认为角膜为各向同性材料。在虚拟分析中, 角膜组织的材料特性参数采用猪眼角膜组织材料特性参数^[2], 如表 1 所示。

表 1 猪眼角膜组织材料特性参数

热参数温度	角膜密度	导热系数	比热
20	1000kg/m ³	0.556W/m·K	3830J/Kg·K

3 理论模型

3.1 热传导的微分方程

一定能量的激光作用在材料表面, 如图 1 所示。假设入射的激光束在空间分布上是均匀的, 材料在各向同性时, 在材料表面建立坐标系, Z 轴指向材料内部。若初始时刻($t=0$)材料的温度为 T_0 , 在一束功率为 P 的激光作用在材料表面, 其中 X-Z 平面上的热导方法为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right] = \frac{\partial}{\partial t} \rho C_p T$$

式中: $T=T(X, Z, t, P, \eta)$ 为物体内部的温度场($^{\circ}\text{C}$), 与时间 t 、功率 P 、能量吸收系数 η 均有关。

λ ——材料的导热系数($\text{W}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$)

ρ ——材料的密度(Kg/m^3)

C_p ——比热容($\text{J}/(\text{Kg}^{\circ}\text{C})$)

材料的密度 ρ 、比热容 C_p 和导热系数 λ 都是材料的热物性参数, 是材料本身具有的性质。

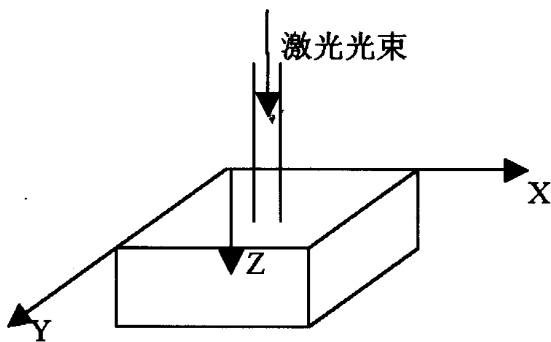


图 1 激光作用在一定材料表面上

3.2 有限元法模型

有限元方法^[6]可以把经典的热传导理论表示为:

$$[Q] \{T^{\Delta}\} + [K] \{T\} = \{p_1\} + \{p_2\} \quad (1)$$

式中 $[Q]$ 、 $[K]$ 分别表示热容量矩阵和热传导矩阵, $\{p_1\}$ 、 $\{p_2\}$ 分别表示热流矢量和内热源矢量。在模型中, 激光只是被作为表面加载, 没有内热源。 $\{T\}$ 和 $\{T^{\Delta}\}$ 分别表示温度矢量和温度变化率矢量, 温度可写成为:

$$T(r, \phi, t) = \sum_{i=1}^N N_i(r, \phi, t) T_i(t) \quad (2)$$

为了解方程(1)可对时间进行积分, 积分步长分别为 Δt , 温度和温度的一阶导数可近似写为:

$$T_i = \frac{1}{2}(T_{i+1} + T_i) \quad (3)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta t} \quad (4)$$

式中 $T_{i+1}=T(t+\Delta t)$; $T_i=T(t)$

把式(2)(3)(4)代入(1)

$$\left[\frac{2Q}{\Delta t} + [K] \right] T_{i+1} = \left[\frac{2Q}{\Delta t} - [K] \right] T_i + (p) \quad (5)$$

式(5)是一个可执行的静态代数问题, 由于每一个时间步的温度都能得到, 从而可得到整个温度随时间的变化关系。

4 基于 FEM 的虚拟分析

4.1 加载和求解

在进行激光热分析的过程中, 首先要定义热源, 就是要确定激光的高斯分布情况, 这里我们采用表面热流形式:

$$Q(x, y, t) = P(t) * (1 - R) / (\pi * r^2) * e^{-\frac{x^2 + y^2}{r^2}}$$

其中:

$P(t)$ ——激光功率, 单位: W。

r ——激光半径, 单位: m。

$R = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{2}{\pi} \ln 2}}$ 表面反射率, 单位: 无。

$e^{-\frac{x^2 + y^2}{r^2}}$ 激光空间高斯分布。

4.2 分析结果

在未考虑热对流和热损失的情况下, 设定角膜的初始温度为 37°C (相当于绝对温度的 310K), 照射时间为 4 秒, 光斑直径为 1mm。分析了能量为 150mW、160mW、170mW、180mW 的激光照射以及模型吸收系数为 0.2、0.4、0.6、0.8、1 的分析结果(如图 2、图 3、图 4 所示)。

图 2 所示为吸收系数为 1 的情况下, 4 秒末模型表面加载中心的温度与能量关系曲线图, 表明在不考虑热损失和热对流的情况下, 表面中心温度与能量是成正比的, 能量越高, 加载后温度越高; 图 3 所示为能量为 150mW 的情况下 4 秒末模型表面加载中心的温度与吸收系数关系曲线图, 表明在不考虑热损失和热对流的情况下, 表面中心温度与吸收系数成正比, 吸收系数越高, 加载后温度越高; 图 4 所示为吸收系数为 1 的情况下能量为 150mW、160mW、170mW、180mW 的激光照射 4 秒后, 在模型深度方向上不同位置的温度曲线, 表明不同能量的情况下, 热量沿深度方向上的穿透时不同的, 并有一定的衰减。图 5 所示为吸收率为 0.8, 能量为 180mW 的情况下的温度分布云图, 可以看出, 温度在光斑半径方向上衰减很快, 这是因为把激光能量当作面载荷加载的缘故, 表面上的点首先吸收激光能量而使温度上升, 继而由于热扩散和热穿透, 能量传向其他点。

5 结论

用有限元方法对激光作用在角膜模型表面的情况进行了热分析, 比较了不同能量、不同吸收系的情况下模型温度分布曲线, 通过比较发现, 能量和吸收系数的改变对模型深度方向

上的温度场分布是有一定影响的,这样,能量就可以直接影响角膜的凝固深度,因此在不同的角膜厚度上应加载不同能量的激光,这样才能达到一定的凝固深度。这一研究结果为激

光作用角膜组织产生热凝固变形机理分析的研究打下了定量的基础。

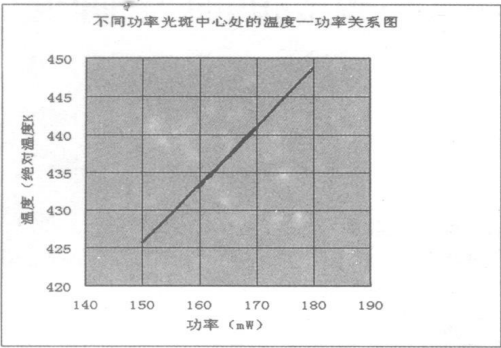


图2 温度-能量关系图

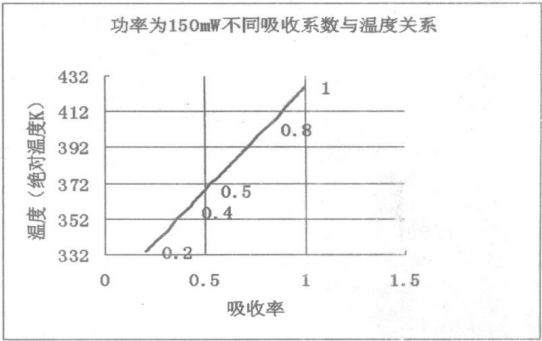


图3 温度-吸收系数关系图

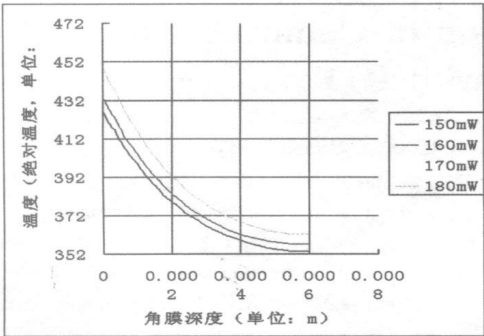


图4 温度-角膜深度关系图

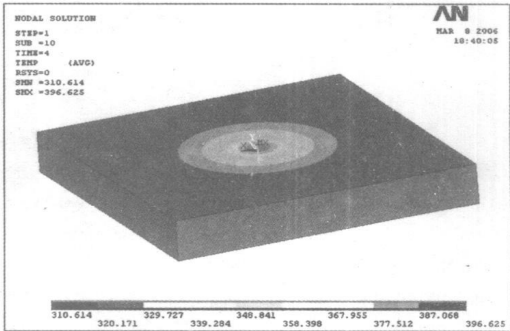


图5 模型表面温度分布图

参考文献

[1] Kyle W. Holman, Stanislav Y. Emelianov, Strain Imaging of Corneal Tissue With an Ultrasound Elasticity Microscope [J] . Cornea 2002 21 (1): 68-73

[2] Berjano E.J.; Saiz J.; Ferrero, J.M. Radio-frequency heating of the cornea: theoretical model and in vitro experiments[J] . Biomedical Engineering, 2002, 49(3): 196-205

[3] John A, Pearce Dorin Panescu. RADIO FREQUENCY CONDUCTIVE

KERATOPLASTY IN THE CORNEA: PREDICTION OF DIOPTRIC CHANGES IN NUMERICAL MODELS (C). Proceedings of the 26th Annual International Conference of the IEEE EMBS, 2004; 5426-5429

[4] 陶丹, 杜之渝. 激光角膜热成形术的研究进展[J] . 中国实用眼科杂志, 2004, 22(11): 848-850

[5] 杨坚, 曾衍钧. 人角膜的生物力学特性[J] . 生物物理学报, 1999, 15(1): 208-214

[6] 倪栋, 段进, 徐久成. 通用有限元分析 Ansys7.0 实例精解[M] . 北京电子工业出版社, 2003; 371-385