

基础医学

# 高功率激光-血管-组织相互作用的红外试验<sup>☆</sup>

饶伟,刘静,周一欣,邓中山,闫井夫,张素清

## Infrared temperature mapping of the interactions among high power lasers, blood vessels and tissues

### Abstract

**AIM:** This study simulated the temperature profiles of vessels and organs subjected to high power heating during a laser-induced interstitial thermotherapy (LITT) through a series of *in vivo* and *in vitro* experiments.

**METHODS:** One rabbit under anesthesia was irradiated on different positions of ear by CO<sub>2</sub> laser applicator (produced by Beijing Kedian Microwave Electronics Co.,Ltd) with wavelength of 10.6 mm. The thermal reaction of the irradiated rabbit, in the regions with few or rich blood vessels, was observed. Two days later, the rabbit was anesthetized to death, and its stomach, liver, lung, kidney and heart were taken out for irradiation respectively. The infrared thermometer was adopted to map the instantaneous temperature image of the testing object.

**RESULTS:** ①When the laser heating was not powerful enough to completely cut off the blood vessel, temperature recovered more quickly in the region with rich blood vessels, compared with that in the region with fewer blood vessels. When focusing the laser heating to the main blood vessel, not only blood supply of the downstream and the heating could be cut off, but blood supply of the upstream would be affected.②Under the same laser beam frequency, heating power and duration time, stomach was the most to be ablated and the largest temperature gradient occurred in kidney.

**CONCLUSION:** ①Local blood perfusion influences the laser effect. ②Due to varied thermal capacity, absorption and reflectance to laser heating, various organs will have different laser penetration depths and temperature changes.

Rao W, Liu J, Zhou YX, Deng ZS, Yan JF, Zhang SQ. Infrared temperature mapping of the interactions among high power lasers, blood vessels and tissues. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu yu Linchuang Kangfu 2007;11(26):5109-5112(China) [www.zglckf.com/zglckf/ejournal/upfiles/07-26/26k-5109(ps).pdf]

Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

Rao Wei<sup>☆</sup>, Studying for doctorate, Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China  
raowei@mail.ipc.ac.cn

Correspondence to: Liu Jing, Investigator, Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China  
jliu@cl.cryo.ac.cn

Supported by: the National Natural Science of China, No. 50325622\*

Received: 2007-01-26  
Accepted: 2007-03-20

### 摘要

目的:通过一系列活体和体外实验来考察激光诱导间质热疗过程中血管及器官受高功率激光作用时的温度场发展规律。

方法:实验性家兔1只,麻醉状态下应用波长为10.6 mm的KD-Ⅲ型CO<sub>2</sub>激光器(北京科电微波电子有限公司生产)在不同功率激光照射其耳部不同部位,观察血管稀疏区与丰富区在激光照射下的反应。隔2 d,将其麻醉处死,取出胃、肝、肺、肾、心等不同器官,进行激光照射。实验中引入红外成像仪来定量刻画被测对象表面的瞬态温度分布图像。

结果:①当激光热量不足以完全切断血管时,血管丰富组织区的复温能力强于血管稀疏区;当激光准确作用于主血管并且达到一定能量时,不仅下游供血及加热可被切断,且上游供血也会受到影响。②在相同的激光频率、功率及作用时间下,胃部的穿透最深,肾部温度变化率最大。

结论:①组织局部的血液灌注率会影响激光作用的效果。②不同器官由于热容量不同,且对激光的反射和吸收率存在差异,导致激光穿透厚度及组织温度变化的幅度不同。

关键词:激光诱导间质热疗;红外成像;生物传热;血管效应;激光医学;生物医学工程

饶伟,刘静,周一欣,邓中山,闫井夫,张素清.高功率激光-血管-组织相互作用的红外试验[J].中国组织工程研究与临床康复,2007,11(26):5109-5112 [www.zglckf.com/zglckf/ejournal/upfiles/07-26/26k-5109(ps).pdf]

## 0 引言

激光诱导间质热疗(laser induced thermotherapy, LITT)是一种已用于肿瘤和其他组织疾病如肝、脑、前列腺和胸部病灶的微创治疗手段<sup>[1-7]</sup>。近期,许多研究集中于LITT下的活体组织传热性能<sup>[8-11]</sup>,特别是,研究者采用了著名的 Pennes 生物传热方程来刻画血液灌注传热,该方法适用于研究相对简单的激光-组织热相互作用。实际上,通过每个单独大血管的血流对LITT下的生物体温度场起着重要的影响。目前,对大血管活体组织热行为的了解较少,这无疑会对采用LITT破坏含大血管病变组织的手术实施带来不利。解剖学上,

大血管经常穿越或包围肿瘤。因此,血流会以对流传热方式将目标肿瘤部位的一部分热量带走,这无疑对LITT的治疗效果造成严重影响。

众所周知,生物传热的重要特征在于同时包括了组织和血流的传热。许多工作集中在血管传热,寻求活体组织的传热机制来预测组织和单个血管的温度分布<sup>[12]</sup>,包括交叉逆流血管对组织传热的影响。近期的研究集中在展示大血管在正常生理温度和病变状态下的温度分布。不过很少有研究注意到激光热疗时活体组织大血管的传热规律。

事实上,血管的行为是LITT治疗中的一个重要因素,治疗计划中温度场的量化十分关键。这是因为大血管显著影响着活体组织的温度场。此方面,Zhou等<sup>[13]</sup>借助于数值途径全面

中国科学院理化技术研究所,北京市100080

饶伟<sup>☆</sup>,女,1981年生,安徽省宿州市人,汉族,中国科学院理化技术研究所在读博士,主要从事生物传热学研究。  
raowei@mail.ipc.ac.cn

通讯作者:刘静,研究员,中国科学院理化技术研究所,北京市100080  
jliu@cl.cryo.ac.cn

国家自然科学基金资助项目(50325622)\*

中图分类号:R318.04  
文献标识码:B  
文章编号:1673-8225(2007)26-05109-04

收稿日期:2007-01-26  
修回日期:2007-03-20  
(07-50-1-580/N-Y)

**课题背景:** 血管在激光诱导间质热疗过程中起着重要的作用,但当前对大的血管相关作用的研究较少。为更深入地了解血管受高功率激光作用时的发展规律,本文进行了系列体外和体内实验。

研究了激光-大血管相关作用问题,Duan等<sup>[14]</sup>对低功率(2 W以下)激光作用下的血管效应进行了红外试验。然而,对实际LITT过程中经常遇到的高功率激光-血管-组织热相互作用问题,迄今没有开展相应的红外试验。

为探明大血管组织及器官在高功率(10 W以上)激光热作用下温度分布的规律,本文分别用激光照射血管分布较为丰富的兔耳(活体)和兔子各个器官(体外),观察实验过程中的温度发展特点。特别是,红外热像仪的引入,可有助于清晰地掌握研究对象全场的热发展规律。本文方法同样适用于其他的医学实践,比如激光外科皮肤问题、去除纹身等。

## 1 材料和方法

**1.1 实验仪器** 如图1所示,实验台包括3个主要部分,激光仪、温度测量装置、被测样本。这里,将波长为10.6 mm的连续激光用作热源,激光采用由北京科电微波电子有限公司生产的KD-III型二氧化碳激光治疗机。其输出光功率可以连续调整,调节激光输入和打开至设定功率约需要30 ms。通过闭环控制电路,可将激光的功率维持在 $\pm 0.1\%$ 。在实验中,指示激光束在激光器顶部被转换为斑点光源,以便对作用靶点进行定位。激光器距目标对象20 cm时,光斑直径约为3 mm。红外热像仪引入监测组织表面二维温度分布,将有助于刻画高功率激光的强烈热作用规律。测试前,需校准红外成像仪,使之温度测量准确度达 $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ ,指示分辨率达 $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 。

**1.2 方法** 长毛兔(购于北京大学医学部实验动物科学部,兔龄3个月)重约2 kg,单独饲养,饲养温度( $26\pm 2$ ) $^\circ\text{C}$ ,经2 d适应喂养后进行测试。实验时,将兔子四肢及牙齿固定在实

验台,展开耳部,将耳内侧暴露在空气中,采用常规麻醉剂注射保证兔处于全麻状态。之后,应用不同功率激光照射耳部不同对象,以观察比较血管与非血管部位在激光照射下的反应。隔2 d,激光照射组织体外实验在兔子心脏停止跳动后进行。取出胃、肝、肺、肾、心等不同器官,进行激光照射实验。观察比较不同组织器官在高功率激光照射下的热场发展规律。

## 2 结果

**2.1 活体动物实验结果与分析** 实验时室温为 $27\text{ }^\circ\text{C}$ 。血管区温度一般高于非血管区温度,这可以通过红外热像图分辨出来。实验分别用不同的功率激光照射兔子耳部主血管区与耳边轮廓区,通过红外图像观察到温度场随时间的变化,并对比血流传热效应。红外图像上不同的颜色可由数字图像处理技术计算出相应的温度,激光照射区最高温度从红外图中读取,从而揭示LITT治疗时血流的冷却效应。

激光照射中血管血流的热学方程可以描述为:

$$Q = mc\Delta t = \rho v A c \Delta t \quad (1)$$

其中, $c$ 为血液比热[J/(kg $\cdot$  $^\circ\text{C}$ )]; $m$ 为血液在血管中的质量流速(kg/s); $\rho$ 为血液密度(kg/m<sup>3</sup>); $v$ 为血液流速(m/s); $A = \frac{\pi}{4} d^2$ 为血管横断面积(m<sup>2</sup>); $d$ 为血管直径; $\Delta t$ 为血管在激光照射前后的温差( $^\circ\text{C}$ ); $Q$ 为血管吸收的热量(J),()内为量的单位,以下同。

在激光连续作用下, $Q$ 值可不失一般性的表示为:

$$Q = f(\mu_a, \phi, \tau, L) \quad (2)$$

其中, $\mu_a$ 为吸收系数; $Q$ 为激光功率(W); $\tau$ 为激光作用时间(s); $L$ 为激光发射点距离目标的距离(m)。

从式(1),(2)可看出,激光作用过程中的血管温升取决于多个物理参数,如:血管半径、血流速度、血流热容以及所吸收的激光功率;而后者又取决于吸收率、作用时间、穿透深度等因素,正是这些差异导致了不同的激光-血管-组织相互热作用。

图2,3为10 W激光作用于血管稀疏区和血管丰富区的红外图像。激光照射时间为1 s。从图中可以看到,随着时间的变化,激光照射血管稀疏区I时,对大血管流动的影响不

大;而当激光照射主血管区 II 时,主血管的温度场逐渐回复,温度逐渐降低。

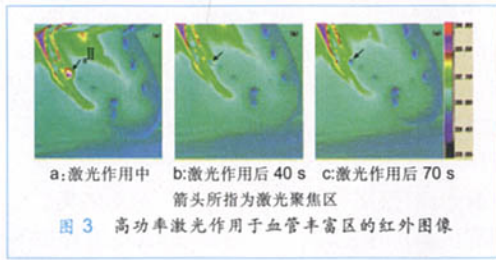
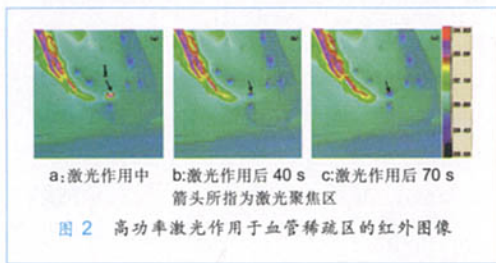
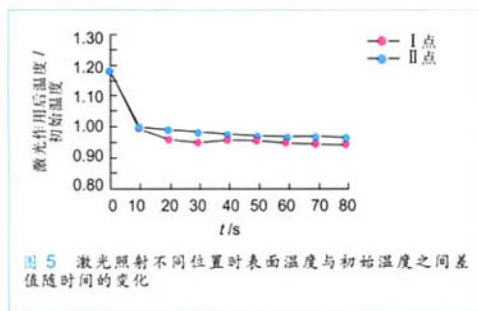
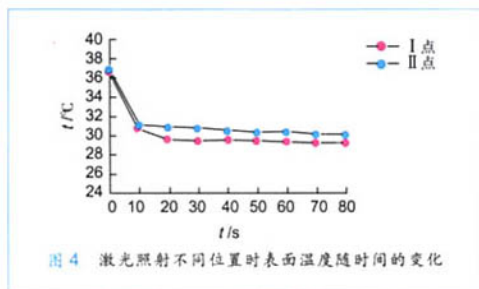


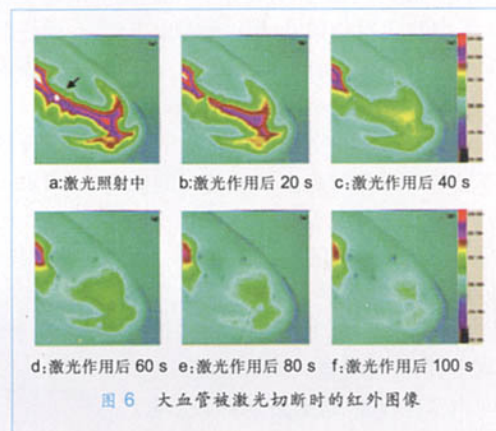
图 4 为激光照射 I、II (对应图 3) 位置时表面温度随时间的变化,图 5 为激光照射后两点温度与其相应初始温度之比随时间的变化。



从图中可以看出,在复温过程中主血管区温度高于血管稀疏区,在激光功率较大时,靠近血管部位在激光灼伤后的温度恢复至损伤前的能力比血管稀疏部位稍强。这可能是由于血管丰富区域,血液流动有效地将集中的热量散发到周围的区域。当激光没有完全切除血管时,血液供应并未终止,持续的血流使血管温度

缓慢恢复,达到某一温度时趋于平衡,但由于部分血管损伤,所以也很难恢复到损伤前的水平。

图 6 为功率为 10 W 的激光在持续时间 2 s 作用下的温度发展情况。通过红外图像可看出大血管部位对激光照射反应异常敏感,血管迅速被切断,血管下游血液不再流通,血管温度下降较快,很长时间内都无法恢复,同时血管上游温度也逐渐降低。这表明血液灌注随损伤发生了很大的变化。值得一提的是,血管并未被完全切断,据红外图像显示血管上游供血 10 min 后逐渐恢复,下游有部分血液流通,但未恢复到激光作用前的水平。



不同部位的血管分布差异较大,使得单位体积内血管密度、直径和流速均不尽相同,因此在相同激光作用下的温度场差异较大。

2.2 体外动物实验结果与分析 不同组织器官的热物性不同,故对激光的反射和吸收率不同,从而使相同激光作用下穿透深度和温度变化也各不相同。在手术中需要充分考虑各个器官的差异性。针对这一问题,实验用高功率激光分别照射兔的主要器官,通过红外热像仪观察温度场的变化,为人体激光热疗提供参考。

图 7 为 20 W 激光照射各组织器官的红外图像,作用时间为 3 s。从图中可以清楚地看到激光作用下,各器官温度场随时间的变化。其中,心脏和肾温度变化幅度较大,分别从 27.3 °C 和 28.5 °C 上升到 54.7 °C 和 57.7 °C,均约为初始温度的 2 倍,脉冲过后 10 s 内又快速下降,均降为初始温度的 1.24 倍。肺、肝、胃部初始温度为 29.3 °C, 30.5 °C, 29.3 °C, 激光作用期间温度升至 52.1 °C, 43.8 °C, 38.7 °C, 约为初始温度的 1.78, 1.40, 1.32 倍,脉冲过后 10 s 降为初始温度的 1.17, 1.11, 1.15 倍。

应用要点:采用红外热成像仪来监测组织表面温度场,一目了然,其可用于激光手术的精确化和数字化治疗。通过动物实验发现,血管丰富区和稀疏区对相同功率相同作用时间激光的热响应不同,同时定性比较了不同组织器官在激光作用下的温度响应和穿透深度。

同行评价:激光诱导间质热疗治疗时,局部组织温度的时间和空间上的变化是应该给予详细研究的。本文用红外成像技术观察温度的升高与恢复,是一种创新,所获得的结果,对于激光治疗有实际的指导意义。但活体观察仅仅测了兔耳,有些局限。

