

# 哺乳动物组织体中光能流率测量\*

谢树森 黄禄华 周川钊 郑蔚 林棋榕 陈荣 黄梅珍

(福建师范大学激光研究所, 福州, 350007)

**摘要:** 本文使用自行设计的光纤探针深度计, 实现了哺乳动物组织体中光能流率的精确测定, 并结合后向散射反射率的测量结果, 利用 Monte Carlo 模型的部分结论, 计算出了猪肉和牛肉组织的光学特性参数。

**关键词:** 动物组织 光能流率测量

## Measurement of radiation energy flowrate in mammal tissue

Xie Shusen, Huang Luhua, Zhou Chuanzhao, Zheng Wei  
Lin Qirong, Chen Rong, Huang Meizhen

(Institute of Laser, Fujian Normal University)

**Abstract:** In this paper, the accurate measurement of the radiation energy flowrate in mammal tissue, using a optical fiber probe depth meter, is described. In the experiment research, combining with the measuring of backscattered reflectance, and using part of conclusions of Monte Carlo model, the optical properties of the pork and beef tissues.

**Key words:** mammal tissue measurement of radiation energy flowrate

## 一、引言

光动力学疗法(Photodynamic Therapy, 简称为 PDT)是一种联合光辐射和光敏剂治疗恶性肿瘤的新方法, 这种方法指出, 杀死肿瘤细胞的效果取决于组织体中的光辐射能流率、光敏剂的浓度和氧的含量。PDT 疗法的首要任务就是确定组织中的光剂量, 即通过对肿瘤及其周围组织光学性质和形状的最优化匹配, 选定照射源的几何形状和辐射强度, 以获得治疗组织体内有最合理的光剂量分布。研究表明, 组织体的光学特性可以用组织体的吸收系数、散射系数和散射相位函数来描述, 通过对组织体中光能流率的测量, 根据漫射理论, 即可计算出组织体的部分光学特性, 因此, 从这些意义上来说, 研究组织体中光能流率的测量及方法有着极其重

\* 国家自然科学基金资助项目。国家教委留学回国人员资助项目。

要的实际意义。

然而,动物组织体中光能流率的测定,在技术上存在较大的困难。早期研究中,测量光能流率是用平切光纤,采取先测量各个方向的辐照度,然后根据各个方向的权重不同来计算光能流率的大小,其工作既繁琐又不精确,近年来研制开发的各向同性球头光纤,能够方便地测出组织中的光能流率。但是,由于组织体(骨组织除外)一般都有很大的弹性,光纤插入时容易产生形变,这样便难以精确定位各向同性球头光纤在组织体中的深度,正因为如此,国外有关文献报导的数据其精度也相当低,光能流率分布曲线只能从一些弥散的点取平均得到。我校研制开发的“光纤探针深度计”成功地解决了这一难题,为组织体中深度的精确定位提供了有效的手段。

## 二、理论基础

考虑用一宽激光束照射组织体表面,即一维问题。组织深部的光剂量可以用光能流率  $\varphi$  (单位为  $W/cm^2$ ) 来描述:

$$\varphi(z) = \varphi_0 k \exp(-z/\delta) \quad (1)$$

式中,  $\varphi_0$  为入射光能流率,  $\delta$  为穿透深度,它是表示组织中光衰减到  $1/e$  的程长。  $k$  为后向散射因子,它表征了后向散射对组织体表面能流率的影响。

穿透深度  $\delta$  的大小取决于组织体的光学特性:

$$\delta = 1/\sqrt{3\mu_a[\mu_a + \mu_s(1-g)]} \quad (2)$$

值得说明的一点是,穿透深度  $\delta$  通常指的真实含义应该是光能流率衰减到  $1/e$  的深度  $z_e$ 。对于纯吸收介质,光按指数规律衰减,  $z_e$  等于  $\delta$ ;而对于浑浊组织体,  $z_e$  不等于  $\delta$ ,这时后向散射因子  $k$  显得特别重要,光能流率衰减到  $1/e$  深度为:

$$z_e = \delta[1 + \ln(k)] \quad (3)$$

光入射到组织体中,由于组织体的后向散射,使得部分光子成为可观测的漫反射光,在组织体外测得的后向散射反射率  $R_s$  (Backscattered reflectance) 反映了组织体中每一个吸收事件过程中所发生有效散射事件的数目。国外学者根据 Monte carlo 模型计算已得到了如下关系:

$$R_s \approx \exp(-7\delta\mu_a) \quad (4)$$

## 三、实验材料与方

### 1. 实验装置

测定动物组织体中光能流率的实验装置如图 1 所示,图中:1 为转向镜,2 为扩束镜,3 为组织体,4 为各向同性球头,5 为测微器,6 为针头固紧螺丝,7 为玻璃片,8 为空心针头,9 为光电倍增管,10 为美国产的 7070 型探测系统。He-Ne 激光束经转向扩束后,以  $\alpha$  角度入射到组织体上,光纤探针深度计垂直置于光

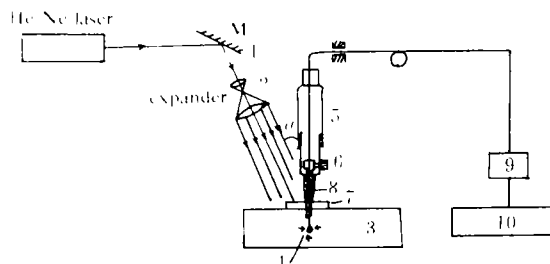


Fig. 1 Experimental setup of measuring the radiation energy flowrate

斑中央,通过深度计上的空心针头,把各向同性球头插入组织体中,而后松开空心针头的固紧

螺丝, 针头回缩约 2mm, 使各向同性球头暴露在组织体中, 便可进行组织体中光能流率的测定。

### 2. 光纤探针深度计定标

本实验中, 从 7070 光电倍增管探测系统读出的是光电流值, 但是, 对于该系统, 究竟多少入射光对应多少光电流呢? 这就存在一个仪器定标的问题, 即确定入射光能流率与光电流之间的换算系数, 从而实现组织体中光能流率的绝对值测量。

定标可采取在一已知功率密度的平行光束中测定仪器的响应, 考虑到其响应要受介质折射率的影响, 定标可在蒸馏水中进行。把各向同性球头光纤探头置于盛满蒸馏水的样品池的中央, 以消除背景、边界等因素的影响。改变入射的光功率密度, 从 7070 探测系统中读出显示的光电流值, 定标结果如表 1 所示:

Table 1 The results of calibration

power density $\varphi$ (mW/cm <sup>2</sup> )	0.29	0.44	0.58	0.73
optical current $I$ ( $\mu$ A)	1.22	1.85	2.36	3.17

由以上结果画出定标曲线如图 2 所示, 求出该直线的斜率即可得到定标方程如下:

$$\varphi = 0.238I \quad (5)$$

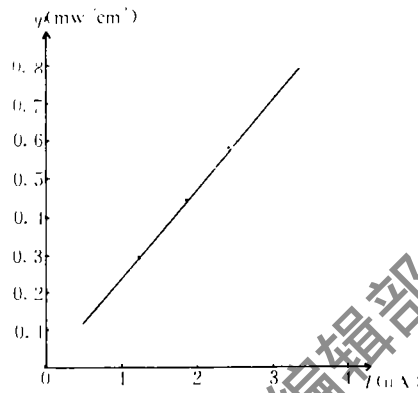


Fig. 2 The calibration curve

### 3. 组织中光能流率的测定

被测组织体采用哺乳动物的离体组织, 实验分别对猪肉和牛肉进行了测定, 组织样品尺寸约为 10cm x 10cm x 5cm。调节图 1 中深度计上部的测微器, 改变光纤探头在组织体中的深度, 便可获得组织体中光能流率随深度的分布情况, 结果见表 2, 3 所示。

Table 2 The measurements of radiant energy fluence rate in porcine muscle in-vitro ( $\varphi_0 = 0.73\text{mW/cm}^2$ )

depth $x$ (mm)	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6			
energy fluence rate $\varphi(x)$ (mW/cm <sup>2</sup> )	4.03	4.38	4.69	4.91	5.26	5.32	5.52	5.43	4.46			
1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	4.1	4.6	5.1
5.50	5.48	5.45	5.36	5.27	5.24	5.07	5.01	4.81	4.61	4.32	4.03	3.74
5.6	6.1	6.6	7.1	7.6	8.1	8.6	9.1	9.6	10.1	10.6	11.1	
3.38	3.12	2.80	2.51	2.32	2.13	1.89	1.69	1.54	1.40	1.26	1.15	

Table 3 The measurements of radiant energy fluence rate in Bovine muscle in-vitro ( $\varphi_0 = 0.61\text{mW/cm}^2$ )

depth $x$ (mm)	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6			
energy fluence rate $\varphi(x)$ (mW/cm <sup>2</sup> )	0.670	0.671	0.624	0.607	0.590	0.571	0.578	0.533	0.478			
1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4	3.9	4.4	4.9	5.4
0.443	0.407	0.357	0.338	0.300	0.276	0.242	0.222	0.193	0.150	0.109	0.080	0.056
5.9	6.4	6.9	7.4	7.9	8.4							
0.040	0.027	0.018	0.013	0.009	0.007							

### 四、结果与讨论

根据表 2, 3 中的测量结果, 可以画出猪肉组织和牛肉组织中光能流率随深度的分布曲线, 如图 3、图 4 所示, 由图形我们可以发现: (1) 在距组织表面较深处, 光能流率的衰减符合指数规律。 (2) 接近组织体表面附近的光能流率都比入射光能流率高, 猪肉组织出现了一个前峰, 牛肉组织出现了一个较平坦区, 这都是组织体的散射特性造成的, 而且说明, 猪肉组织的散射大于牛肉组织的散射。 (3) 牛肉组织中光能流率的衰减明显快于猪肉组织, 这说明牛肉组织的吸收要大于猪肉组织的吸收。从下面的组织光学特性参数的计算结果也可以证明上述结论。

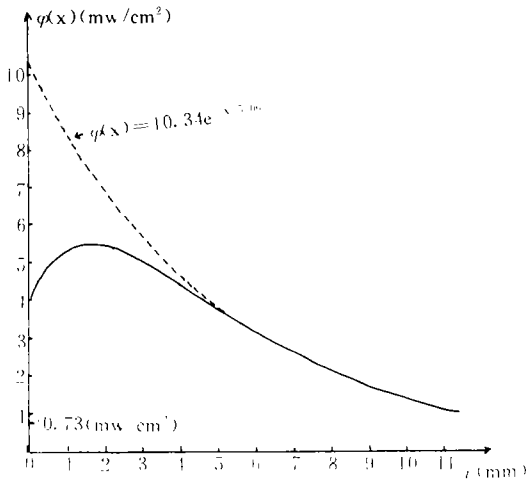


Fig. 3 Distribution of energy flowrate in porcine muscle

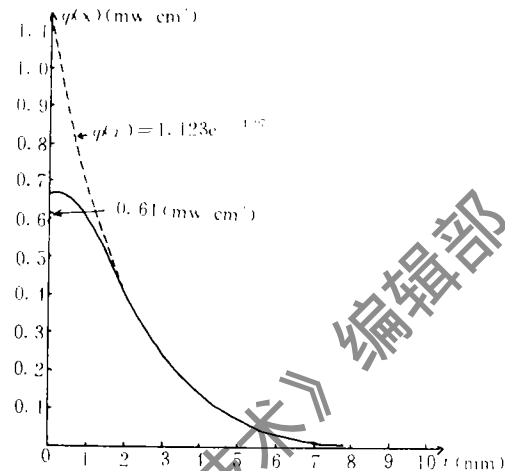


Fig. 4 Distribution of energy flowrate in bovine muscle

分别对图 3、图 4 中组织深处的光能流率分布进行曲线拟合, 便可求得猪肉和牛肉组织的光穿透深度, 由穿透深度  $\delta$  和我们在另一文中测得的后向散射反射率  $R_s$  (猪肉组织  $R_s = 0.224$ , 牛肉组织  $R_s = 0.162$ ), 根据方程 (4) 计算出组织体的吸收系数  $\mu_a$ , 再由方程 (2) 求出组织体的有效散射系数  $\mu_s(1-g)$ 。计算结果见表 4 所示。

Table 4 Optical properties of porcine and bovine muscle in-vitro (wavelength  $\lambda = 630\text{nm}$ )

tissue	penetration depth $\delta$ (mm)	absorption $\mu_a$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	effective scattering $\mu_s(1-g)$ ( $\text{cm}^{-1}$ )
porcine	5.06	0.4	2.7
bovine	1.97	1.3	5.3

根据 Marynissen 和 Wilksch 等人测得猪肉和牛肉组织的平均散射余弦值 (猪肉  $g = 0.97$ , 牛肉  $g = 0.3$ ), 可以计算猪肉和牛肉组织的散射系数分别为  $90.0\text{cm}^{-1}$ ,  $7.6\text{cm}^{-1}$ 。于是, 我们可以计算出猪肉和牛肉组织的散射系数与吸收系数的比值分别为 225 和 5.85。由此可见, 猪肉组织的散射大于吸收, 而牛肉组织的散射只略大于吸收, 呈现出较强的吸收特性。

### 五、结 论

本文实现了哺乳动物组织体光能流率的测量, 并计算出了猪肉和牛肉组织的穿透深度  $\delta$ , 吸收系数  $\mu_a$  和有效散射系数  $\mu_s(1-g)$ 。猪肉:  $\delta = 5.06\text{mm}$ ,  $\mu_a = 0.4\text{cm}^{-1}$ ,  $\mu_s(1-g) =$

版权所有 © 《激光技术》编辑部