

文章编号: 0258-7025(2001)06-0573-04

Kubelka-Munk 模型下人血管对 He-Ne 激光的散射与吸收特性

魏华江¹ 李晓原² 巫国勇³ 刘小星² 魏冬季² 谭润初²

$\left(\begin{array}{l} ^1 \text{ 广东药学院物理教研室 广州 510224} \\ ^2 \text{ 中山大学激光医学研究室 广州 510089} \\ ^3 \text{ 中山大学第一附属医院心胸外科 广州 510080} \end{array} \right)$

提要 测量了人动脉和静脉对 He-Ne 激光的反射和透射传输特性。实验采用两积分球系统及波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器,并根据测量数据及采用 Kubelka-Munk 模型分析和计算了人动脉和静脉组织对该波长激光的吸收系数、散射系数及总的光强 $I(x)$ 及前向散射通量 $I_f(x)$ 和后向散射通量 $I_b(x)$ 随厚度的变化情况。结果表明,人动脉和静脉的漫反射率和透射率有明显差别,而且,动脉对激光的吸收系数和散射系数明显较静脉的大,在动脉和静脉组织中 $I(x)$ 、 $I_f(x)$ 和 $I_b(x)$ 随厚度的变化情况也有明显的区别。

关键词 Kubelka-Munk 模型, He-Ne 激光, 人血管, 散射与吸收特性

中图分类号 R 318.51 文献标识码 A

Scattering and Absorbing Characteristics of Human Arteries and Veins in Kubelka-Munk Model at He-Ne Laser in Vitro

WEI Hua-jiang¹ LI Xiao-yuan² WU Guo-yong³
LIU Xiao-xing² WEI Dong-ji² TAN Run-chu²

$\left(\begin{array}{l} ^1 \text{ Physics Department of Guangdong College of Pharmacy, Guangzhou, 510224} \\ ^2 \text{ Laser Medicine Department of Sun Yat-sen University of Medical Sciences, Guangzhou 510089} \\ ^3 \text{ First Affiliated Hospital of Sun Yat-sen University of Medical Sciences, Guangzhou 510080} \end{array} \right)$

Abstract The diffuse reflectance and transmittance of human arteries and veins were studied with 632.8 nm of He-Ne laser. The measurements were performed with two standard integrating sphere systems. The absorption coefficient, scattering coefficient and the changes of total optical intensities $I(x)$, forward scattering flux $I_f(x)$, backward scattering flux $I_b(x)$ as a function of thickness of human arteries and veins were evaluated and analyzed from the experimented data by Kubelka-Munk model. The results of measurement showed significant difference of diffuse reflectance and transmittance between arteries and veins at 632.8 nm wavelength of He-Ne laser. Furthermore, the absorption coefficient and the scattering coefficient of arteries were obviously bigger than that of veins at He-Ne laser wavelength. The changes of $I(x)$, $I_f(x)$ and $I_b(x)$ as a function of thickness of human arteries and veins were also significant difference.

Key words human, Kubelka-Munk model, He-Ne laser, human arteries and veins, absorption and scattering properties

1 引言

随着激光在医学方面的应用日益广泛,激光在心血管疾病中的应用越来越受到人们的重视^[1],因此,对于光通过血管的各种光学性质的了解就显得

十分必要。血管的微观结构比较复杂,影响光学性质的因素也比较多,但宏观的光线在混浊介质的唯象理论可以作为血管的光学模型的近似。本文将 Kubelka-Munk 模型(K-M 模型)应用于血管,采用两个标准积分球系统对新鲜离体人动脉和静脉组织在 K-M 模型下对 632.8 nm 的 He-Ne 激光的散射与吸收特性进行了测量和计算及分析。

2 材料和方法

2.1 实验装置

实验装置由 He-Ne 激光器(具体参数为:功率 2 mW,光斑直径 2 mm,辐照功率密度 19.9 mW/cm²)、分束器、光阑、两个积分球及漫反射测定仪组成。实验用一积分球收集动脉、静脉样本表面所有的漫反射光线,用另一积分球收集所有透射光线。测量光路如图 1 所示。

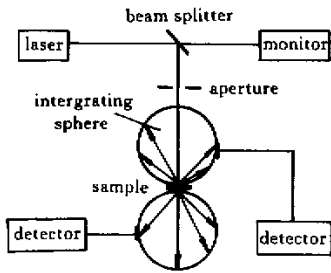


图 1 测量装置示意图

Fig.1 Sketch map of measurement equipment

2.2 标本制备

实验用新鲜离体人肺动脉及胃大网膜静脉。标本取下即用生理盐水保存并置冰箱冷藏,实验时才取出,全过程在 3 h 内完成。制备方法是剥去标本外侧的脂肪组织,将血管沿轴向切开,用生理盐水冲洗后将标本用特制的标本固定片(不透光的黑色薄片其中钻一个直径为 5 mm 的圆孔)平展于圆孔并用透明胶布将标本(标本面积为 7.2 mm × 12.4 mm)两端粘贴固定,放置于二积分球之间后用于测量。

2.3 测量方法

漫反射率采用置换法测量^[2]。即先测量漫反射标准板的反射值 K_p ,再测量样品的漫反射值 K_s ,最后由公式 $R_d = (K_s/K_p)\rho$ 计算漫反射率。其中 ρ 为相应波长对应的漫反射标准板的反射率。透射率则由公式 $T = I_s/I_o$ 计算,其中 I_s 为通过标本的透射量, I_o 为总透射量。激光照射从内侧到外侧,分别对每种组织作同样条件的 8 次测量,所测数据有很好的重复性,表中列出的数据为 8 次测量结果的平均值及标准差。统计学处理是利用电子计算机调用 SPSS 8.0 for windows 统计软件包进行 t 检验。

由 K-M 模型^[3]可知,当光入射到厚度为 X (cm) 的平行层混浊介质时,认为它的散射光只有两部分(如图 2 所示),即前向散射和后向散射。假定在位置 x 的前向散射和后向散射通量分别为 $i(x)$ 和 $j(x)$,从样品内部出来的后向散射光反映了介质的

反射性质,用反射系数 R 表示。类似地,它的前向散射光就是透射,由透射系数 T 表示。于是得出介质的吸收系数 A (cm⁻¹),散射系数 S (cm⁻¹) 有关的一组基本方程

$$\begin{aligned} -\frac{di}{dx} &= -(A + S)i + Sj \\ \frac{dj}{dx} &= -(A + S)j + Si \end{aligned} \quad (1)$$

边界条件是: $x = 0, i = I_0 = 1, x = X, j = 0$ 。

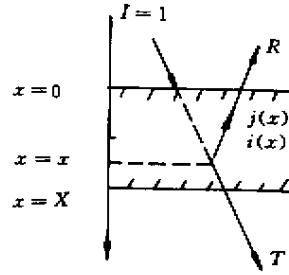


图 2 Kubelka-Munks 模型

Fig.2 Kubelka-Munks model

在一般情况下, S 和 A 是 x 的函数,而这种函数关系是不知道的。在这里可认为在 X 范围 A/S 和 $(A + S)/S$ 是不变的,而 S 是一个变量,于是上述微分方程的解为^[4]

$$\begin{aligned} i(x) &= [(b \sinh \Phi - a \cosh \Phi) \sinh \phi + (a \sinh \Phi - b \cosh \Phi) \cosh \phi] \cdot (a \sinh \Phi - b \cosh \Phi)^{-1} \\ j(x) &= (-\cosh \Phi \sinh \phi + \sinh \Phi \cosh \phi) \cdot (a \sinh \Phi - b \cosh \Phi)^{-1} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $a = (A + S)/S, b = \sqrt{a^2 - 1}, \phi = bsx, \Phi = bsX$ 。

于是宏观量反射系数 R 和透射系数 T 就可以得到。它们分别是 $j(x = X)$ 和 $i(x = X)$ 时的值。即

$$T = -b / (a \sinh \Phi - b \cosh \Phi) \quad (3)$$

这里当 $x = 0$ 时的直接反射予以忽略。在坐标 x 的总的光强 $K(x)$ 等于 $i(x)$ 和 $j(x)$ 之和。于是从(2)式立即得出

$$\begin{aligned} K(x) &= [b(\sinh \Phi \sinh \phi - \cosh \Phi \cosh \phi) + (a + 1)(\sinh \Phi \cosh \phi - \cosh \Phi \sinh \phi)] \cdot (a \sinh \Phi - b \cosh \Phi)^{-1} \end{aligned} \quad (4)$$

从(3)式又可推出

$$\begin{aligned} A &= [(1 + R^2 + T^2)/2R - 1]S \\ S &= -\frac{1}{Xb} \ln \left[\frac{1 - R(a + b)}{T} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

这样就把实验可以得到的 R 及 T 和介质的散射系数及吸收系数联系起来。如果将人动脉和静脉组织

看作是平行的混浊介质,其厚度分别为 X_a 和 X_v ,其吸收系数和散射系数分别是 A_a 和 S_a 与 A_v 和 S_v ,这样就可根据实验测量的数据及 K-M 模型的计算公式,并通过电子计算机在 Pwin 98 下调用 Excel 8.0 中的函数功能进行计算处理。

表 1 人动脉和静脉对 He-Ne 激光的漫反射率和透射率 ($\bar{x} \pm s$)

Table 1 Significant difference of diffuse reflectance and transmittance ($\bar{x} \pm s$) of human arteries and veins at He-Ne laser

Wavelength/nm	Human arteries		Human veins	
	R_a	T_a	R_v	T_v
632.8	0.154 ± 0.007	0.437 ± 0.019	0.074 ± 0.004	0.833 ± 0.012

表 2 人动脉和静脉在 K-M 模型下对 He-Ne 激光的吸收系数和散射系数 (cm^{-1})

Table 2 Absorption and scattering coefficients (cm^{-1}) of human arteries and veins in Kubelka-Munk model at He-Ne laser ($\bar{x} \pm s$)

Wavelength/nm	Human arteries		Human veins	
	A_a	S_a	A_v	S_v
632.8	23.09 ± 1.28	7.84 ± 1.11	16.45 ± 2.27	1.57 ± 0.21

由表 1 可见,动脉和静脉对波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光的漫反射率有明显的差别 ($P < 0.01$),其相应波长的透射率也有明显不同 ($P < 0.01$)。由测量结果并按 K-M 模型分别计算动脉和静脉对波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光的吸收系数和散射系数(测得人肺动脉和人胃大网膜静脉的平均厚度分别为 0.270 ± 0.02 mm 和 0.100 ± 0.01 mm),计算结果如表 2 所示。

3.2 人肺动脉和人胃大网膜静脉中的光强

利用公式 (2) 和 (4) 及上述结果,可通过电子计算机在 Pwin 98 下调用 Excel 8.0 的计算功能计算出在 K-M 模型下,人肺动脉、人胃大网膜静脉组织中的总光强 $I(x)$,前向散射通量 $i(x)$,后向散射通量 $j(x)$ 随组织的厚度 x 的变化情况,并通过电子计算机的自动作图功能进行作图,分别得出人动、静脉组织在 K-M 模型下, $I(x)$, $i(x)$, $j(x)$ 随 x (μm) 变化的曲线图,如图 3、图 4 所示。

4 讨论

激光与组织相互作用,在入射面出现漫反射现象。漫反射的大小受到组织的成分、结构及表面粗糙程度等的影响,漫反射的差异反映了激光进入照

3 结果

3.1 人肺动脉和人胃大网膜静脉的吸收系数和散射系数

采用 632.8 nm 的 He-Ne 激光照射人动脉和静脉,测定漫反射率和透射率的结果如表 1 所示。

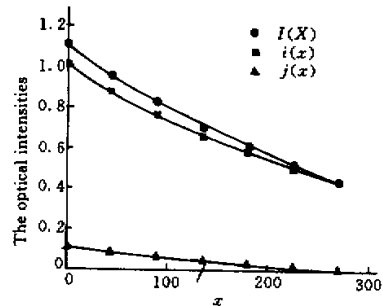


图 3 人动脉在 K-M 模型下的光强随 x 的变化情况

Fig.3 Optical intensities of human arteries in Kubelka-Munk model are changed with x

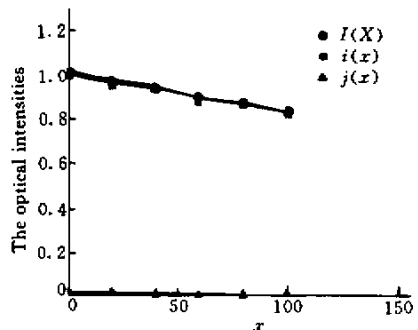


图 4 人静脉在 K-M 模型下的光强随 x 的变化情况

Fig.4 Optical intensities of human veins in Kubelka-Munk model are changed with x

射组织激光量的不同^[5,6]。如果组织对激光的漫反射率大,进入组织的激光量则减少。由表 1 可见,动

脉和静脉对波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光的漫反射率和透射率明显不同。从表 2 可见,动脉和静脉的吸收系数、散射系数有明显差异,前者明显较后者要大。从图 3 和图 4 可见, $\mu(x)$ 及 $\mu_s(x)$ 和 $\mu_t(x)$ 在动脉组织中的衰减明显较在静脉组织中要大,而动脉组织表面(即在曲线中 $x=0$ 处)的 $\mu_t(x)$ 明显较静脉组织表面的要大,在穿透动脉和静脉组织时(即 $x=X$ 处)动脉组织的 $\mu(x)$ 及 $\mu_s(x)$ 明显较静脉组织的要小。可见,这主要是由于动脉和静脉组织的结构及组成成分不同所致。

生物组织对激光的吸收及散射特性等光学性质是激光临床应用的基础。不同的生物组织由于其构成的成分及结构不同,其光学性质也不同。即表现为光学参数的不同。用 He-Ne 激光器输出的 632.8 nm 激光^[7]进行血管内照射治疗近几年在国际上得到迅速发展^[8],在我国也有一定的应用。其治疗方法是将 He-Ne 激光通过光纤长时间导入血管内进行照射,这是一种有损伤的治疗方法,它不仅使患者痛苦,而且存在着交叉感染的可能。为了避免光纤刺入血管内,达到无损伤光疗,有人提出一种无损伤的激光治疗方法^[9],就是用激光直接照射,使激光通过皮肤、皮下软组织和血管等组织达到血液中。因此,了解人皮肤浅表组织、角质层、血管和血液等组织的光学性质,对激光的临床应用具有十分重要的意义^[9]。但是,到目前为止,对于血管的光学性质研究不多,尤其是采用 K-M 模型来分析和计算。本文研究表明,采用 K-M 模型可更为清楚地了解动脉和静脉对 He-Ne 激光的漫反射和透射性质及吸收和散射性质以及其光强的变化情况,其结果对 He-Ne 激光

进行血管疾病等的临床治疗作用机理的探讨及临床应用提供参考。

参 考 文 献

- 1 W. E. Faught, R. F. Lawrence. Vascular applications of lasers. *Surg Clin North Am.*, 1992, **72**(3): 681 ~ 686
- 2 Gao Guanghuang, Zhang Guisu, Chen Zongli *et al.*. Measurement of skin diffuse reflectance ratio of laser radiation. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1985, **12**(12): 732 ~ 734, 741 (in Chinese)
- 3 A. Seiyama, S.-S. Chen, H. Kosaka *et al.*. Microspectroscopic measurement of the optical properties of rat liver in the visible region. *J. Microscopy*, 1994, **175**(1): 84 ~ 89
- 4 Yang Yuanlong, Li Fuming. A physical model for laser beam penetration in skin. *Applied Laser* (应用激光), 1985, **5**(3): 127 ~ 130 (in Chinese)
- 5 D. Sliney, M. Wolbarsht. Safety with Laser and Other Optical Sources. New York, Plenum, 1980. 164 ~ 168
- 6 R. Splinter, W. F. Cheong, M. J. C. van Gemert *et al.*. In vitro optical properties of human and canine brain and urinary bladder tissues. *Laser Surg. Med.*, 1989, **9**(1): 37 ~ 42
- 7 Jing Chen, Dai Chengxiang, Liu Ruiyun *et al.*. Effect of intravascular low level laser irradiation therapy on the platelet activation in patients with coronary heart disease. *Chin. J. Laser Med. Surg.* (中国激光医学杂志), 1996, **5**(2): 98 ~ 102 (in Chinese)
- 8 Sun Zhenquan, Luo Guoyi, Ma Qinjuan. The combination of intravascular He-Ne laser irradiation and bonefos in the analgetic treatment of metastatic carcinoma of bone—analysis of 50 cases. *Chin. J. Laser Med. Surg.* (中国激光医学杂志), 1997, **6**(2): 94 ~ 95 (in Chinese)
- 9 Meng Jiwu, Ren Xinguang. Study of laser therapy of non-wounds on low intensity laser. *Chin. J. Laser Med. Surg.* (中国激光医学杂志), 1998, **7**(3): 178 ~ 179 (in Chinese)