

Kubelka-Munk 模型下的兔血管对 Ar⁺ 激光的散射与吸收特性

魏华江

李晓原 刘小星 魏冬季 谭润初

(广东药学院物理教研室, 广州, 510224)

(中山医科大学激光医学研究室, 广州, 510089)

摘要: 测量了兔动脉和静脉对 Ar⁺ 激光的反射和透射传输特性。实验采用两积分球系统及 Ar⁺ 激光器, 并根据测量数据和采用 Kubelka-Munk 模型分析, 计算了兔动脉与静脉组织对该波长激光的吸收系数、散射系数、总光强 $I(x)$ 及前向散射通量 $i(x)$ 和后向散射通量 $j(x)$ 随厚度的变化情况。结果表明, 兔动脉与静脉的漫反射率和透射率有明显差别, 且动脉对激光的吸收系数明显较静脉的小, 而动脉对激光的散射系数却明显较静脉的大, 在动脉和静脉组织中总光强 $I(x)$ 、前向散射通量 $i(x)$ 和后向散射通量 $j(x)$ 随厚度的变化情况也有明显的区别。

关键词: 兔 Kubelka-Munk 模型 Ar⁺ 激光 血管 散射与吸收特性

Scattering and absorbing characteristics of rabbit arteries and veins in Kubelka-Munk model at 488.0nm wavelength of Ar⁺ laser in vitro

Wei Huajiang^{*}, Li Xiaoyuan, Liu Xiaoxing, Wei Dongji, Tan Runchu

(* Dept. of Physics, Guangdong College of Pharmacy, Guangzhou, 510224)

(Dept. of Laser Medicine, Sun Yat-sen University of Medical Sciences, Guangzhou, 510089)

Abstract: The diffuse reflectance and transmittance of rabbit arteries and veins are studied with the help of Ar⁺ laser. The measurements are performed with two standard integrating sphere systems. Based on Kubelka-Munk model and experiments, the absorption coefficient, scattering coefficient and the changes of total optical intensities $I(x)$, forward scattering flux $i(x)$, backward scattering flux $j(x)$ as a function of thickness of rabbit arteries and veins have been evaluated and analyzed. Measurement results show that there is significant difference of reflectance and transmittance between arteries and veins at 488.0nm wavelength of Ar⁺ laser. At the same time, the absorption coefficient of arteries is obviously lower than that of veins and the scattering coefficient is much higher than that of veins. Although total optical intensities $I(x)$, forward scattering flux $i(x)$, backward scattering flux $j(x)$ are functions of thickness of rabbit arteries and veins respectively, there are obvious difference between arteries and veins.

Key words: rabbit Kubelka-Munk model Ar⁺ laser arteries and veins absorption and scattering properties

引 言

随着激光在临床医学应用的日益广泛, 它在心血管疾病中的应用越来越受到人们的重视^[1], 出现许多新的技术, 如激光血管吻合术、激光血管成形术、激光血管内照射^[2]方法等。其中, Ar⁺ 激光已用于激光血管吻合术、激光血管成形术及用于激发粥样硬化斑块或动脉组织荧光等。因此, 充分了解 Ar⁺ 激光通过血管组织的各种光学特性对于激光的有效治疗有重要的意义。但是, 血管的微观结构比较复杂, 影响光学性质的因素也比较多。然而, 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。我们将 Kubelka-Munk 模型(简称

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兔动脉和静脉组织在 K-M 模型下对 488.0nm 的 Ar⁺ 激光的散射与吸收特性进行了测量、计算及分析。

1 材料和方法

1.1 激光光源

采用 360 型 Ar⁺ 激光器, 激光参数是: 波长为 488.0nm, 功率为 10mW, 光斑直径为 4mm, 辐照能流率为 79.6mW/cm²。

1.2 实验装置

实验装置由激光器、分束器、光栏、两个积分球(光积分)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。

1.3 样品制备

实验采用新西兰兔 30 只, 用 3% 戊巴比妥钠麻醉后分离主动脉和颈静脉, 样品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 3h 内完成。制备方法是剥去样品外侧的脂肪组织, 将血管沿轴向切开, 用生理盐水冲洗后将样品用特制的样品固定片(不透光的黑色薄片其中钻一个直径为 5mm 的圆孔)平展于圆孔, 并用透明胶布将样品(样品面积均取为 6.5mm × 7.5mm)两端粘贴固定, 分别放置于二积分球之间后用于测量。

1.4 测量方法

漫反射率采用置换法测量^[3]。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 $R = (K_s / K_p) \rho$ 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 为通过样品的透射量, I_o 为总透射量。激光照射从内侧到外侧, 分别对每个样品作同样条件的 8 次测量, 所测数据有很好的重复性,

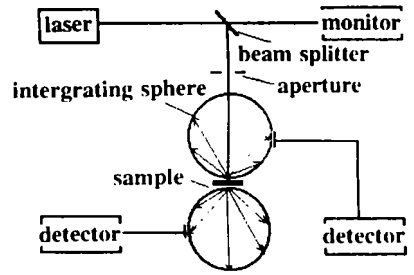


Fig.1 Sketch map of measurement equipment

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^[4]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。我们假定在位置 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, 我们用反射系数 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。于是得出和介质的吸收系数 A (cm^{-1}), 散射系数 S (cm^{-1}) 有关的一组基本方程:

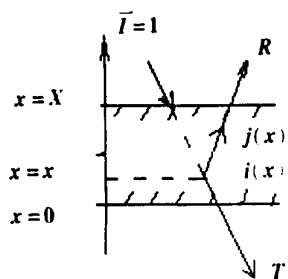


Fig.2 Kubelka-Munk model

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

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。这里, 我们认为在 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^[5]:

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

$$\left. \begin{aligned} i(x) &= (a \sinh \phi + b \cosh \phi) / (a \sinh \Phi + b \cosh \Phi) \\ j(x) &= \sinh \phi / (a \sinh \Phi + b \cosh \Phi) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

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

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 $i = (x = 0)$ 时的值。即:

$$\left. \begin{aligned} R &= \sinh \Phi / (a \sinh \Phi + b \cosh \Phi) \\ T &= b / (a \sinh \Phi + b \cosh \Phi) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

这里, 当 $x = X$ 时的直接反射予以忽略。在坐标 x 的总光强 $I(x)$ 等于 $i(x)$ 和 $j(x)$ 之和。于是从(2)式立即得出:

$$I(x) = \frac{(a + 1) \sinh \phi + b \cosh \phi}{a \sinh \Phi + b \cosh \Phi} \quad (4)$$

从(3)式又可推出:

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

这样, 就把实验可以得到的反射系数 R 及透射系数 T 和介质的散射系数及吸收系数联系起来。如果将兔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 , 它们的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 Pwin98 下调用 Excel8.0 中的函数功能进行计算处理。

2 结 果

2.1 兔动脉和静脉的吸收系数和散射系数

采用 488.0nm 波长的 Ar^+ 激光照射兔动脉和静脉, 测定漫反射率和透射率的结果如表 1 所示。

由表 1 可见, 动脉和静脉对波长为 488.0nm 的 Ar^+ 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

Table 1 The significant difference of diffuse reflectance and transmittance ($\bar{x} \pm S$) of rabbit arteries and veins at Ar^+ laser

wavelength (nm)	rabbit arteries		rabbit veins	
	R_a	T_a	R_v	T_v
488.0	0.364 ± 0.036	0.322 ± 0.058	0.145 ± 0.092	0.662 ± 0.146

Table 2 The absorption and scattering coefficients (cm^{-1}) of rabbit arteries and veins in Kubelka-Munk model at Ar^+ laser ($\bar{x} \pm S$)

wavelength (nm)	rabbit arteries		rabbit veins	
	A_a	S_a	A_v	S_v
488.0	34.15 ± 1.24	48.92 ± 1.74	54.23 ± 1.96	13.45 ± 0.87

模型分别计算动脉和静脉对 488.0nm 波长的 Ar^+ 激光的吸收系数和散射系数, 计算结果如表 2 所示。测得动脉和静脉的平均厚度分别为 (0.15 ± 0.1) mm 和 (0.06 ± 0.02) mm。

2.2 兔动脉和静脉中的光强

利用(2)式和(4)式及上述结果, 可通过电子计算机计算出在 K-M 模型下, 兔动、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, 分别得出兔动、静脉组织在 K-M 模型下, 总光强 $I(x)$ 、前向散射通量 $i(x)$ 、后向散射通量 $j(x)$ 随 x (mm) 变化的曲线图, 如图 3、图 4 所示。

3 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射组织激光量的不同^[6,7]。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 488.0nm 波长的 Ar⁺ 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有明显差异,动脉的吸收系数明显较静脉的要小。而动脉和静脉的散射系数也有明显差异,动脉的散射系数明显较静脉的要大。从图 3 和图 4 可见,总光强 $I(x)$ 及前向散射通量 $i(x)$ 和后向散射通量 $j(x)$ 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 的最

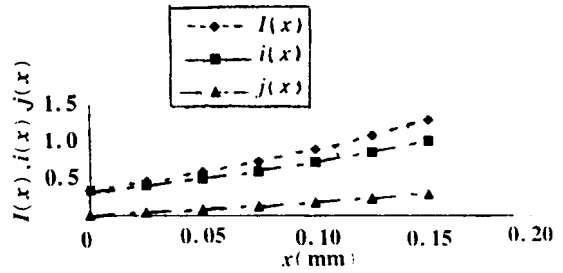


Fig. 3 The optical intensities of rabbit arteries in Kubelka-Munk model are changed with x

大值处)的后向散射通量明显较静脉组织表面的要大,在穿透动脉和静脉组织时(即 $x = 0$ 处),动脉组织的总光强 $I(x)$ 及前向散射通量 $i(x)$ 明显较静脉组织的要小。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,

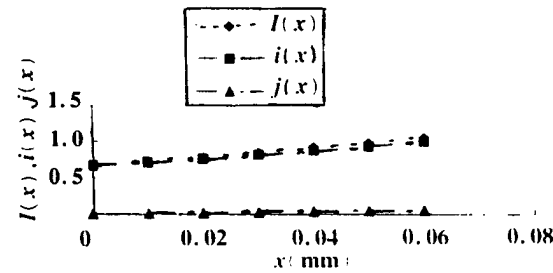


Fig. 4 The optical intensities of rabbit veins in Kubelka-Munk model are changed with x

其光学性质也不同,即表现为其光学参数的不同。到目前为止,血管的光学性质研究不多,尤其是采用 K-M 模型来分析和计算的,在国内尚未见报道。本实验测量了血管组织对激光的漫反射率和透射率,并根据 K-M 模型分析,计算其吸收系数和散射系数及在组织中光强的变化情况。研究表明,采用 K-M 模型可更清楚地了解动脉和静脉对 Ar⁺ 激光的漫反射、透射性质及吸收和散射性质及其光强的变化情况。目前,Ar⁺ 激光已用于激光血管吻合术、激光血管成形术及用于激发粥样硬化斑块或动脉组织荧光、血管瘤及视网膜^[8,9] 等治疗。本实验测量的血管对 Ar⁺ 激光的光学参数,有助于更好地选择治疗激光的照射方案。

参 考 文 献

- 1 Faught W E, Lawrence P F. Surg Clin North Am, 1992; 72(3): 681
- 2 霍晓刚,张颖冬,狄 晴 *et al.* 光电子·激光, 2000; 11(1): 92~ 94
- 3 高光煌,张桂素,陈宗礼 *et al.* 中国激光, 1985; 12(12): 732
- 4 Seiyama A, Chen S-S, Kosaka H *et al.* J Microscopy, 1994; 175(1): 84~ 89
- 5 杨远龙,李富铭. 应用激光, 1985; 5(3): 127~ 130
- 6 Sliney D, Wolbarsht M. Safety with Laser and Other Optical Sources. New York: Plenum, 1980: 164~ 168
- 7 Splinter R, Chong W F, van Gemert M J C *et al.* Laser Surg Med, 1989; 9(1): 37
- 8 胡兆科,高汝龙,李毓敏 *et al.* 中国激光医学杂志, 1994; 3(4): 218~ 221
- 9 钱 进,王光璐,张 风. 中国激光医学杂志, 1998; 7(4): 208~ 210

作者简介:魏华江,男,1961年5月出生。副教授。一直从事医药物理学教学及激光医学研究工作。