

激光束心肌打孔改善心肌微循环动物实验研究*

宗仁鹤 程国义 胡宗福 杨 勇 阚成侠

(合肥工业大学激光技术应用研究所, 230009)

朱鸿良 严中亚

(安徽省心血管疾病研究所)

Experiments on improvement of myocardial microcirculation by laser myocardium

Zong Renhe, Cheng Guoyi, Hu Zongfu, Yang Yong, Kan Chengxia

(Institute of Laser Technology & Application, University of Polytechny of Hefei, Hefei)

Zhu Hongliang, Yan Zhongya

(Cardiovascular Diseases Institute of Anhui, Hefei)

Abstract: Myocardial revascularization by laser is a kind of operation which uses laser beam to converge on the surface of myocardium and punch from epicardium to endocardium. The blood in heart can directly make nutrition for myocardium. It is not necessary to incise heart and put into bridging operation. Experimental results are reported about punching minute holes in myocardium of animals (i. e pig, dog, or sheep) by CO₂ laser to improve the myocardial microcirculation.

Keywords: minute holes, myocardial revascularization by laser, myocardial microcirculation

心血管疾病是目前死亡率较高的一种疾病。现在美国、苏联和日本等国都在进行激光心血管疾病的实验研究。激光心肌血管重建术已经取得了很大进展^[1~4]。我国从1987年开展了激光束心肌打孔改善心肌微循环的动物实验研究。激光心肌血管重建术系采用激光束辐照心肌表面,从心外膜打出细孔直达心内膜的手术,不必切开心脏,它优于通常的“搭桥”手术。本文报道采用CO₂激光束,以猪、狗、羊等为对象进行激光心肌血管重建术,以改善心肌微循环的实验结果。

一、激光波长的选择

在生物组织内部,激光的散射和吸收是主要的,两者都强烈地依赖于波长。

受辐照的生物组织对激光能量的吸收,可采用 Lambert-Beers 定律近似公式^[5],

* 本项目得到国家自然科学基金资助。

$$I(z) = I_0 \exp(-\alpha z) \quad (1)$$

式中 I_0 是入射于具有均匀吸收系数 α 的组织表面的光强, $I(z)$ 是深度为 z 处的光强, α 为生物组织的吸收系数。例如, 皮肤对 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光吸收系数小于 10 cm^{-1} , 任何湿组织对 CO_2 激光的吸收系数为 $5 \times 10^2 \text{ cm}^{-1}$ 。从公式(1)中导出一个有用的物理量 z_A 是吸收深度, 其值对任何组织定义为

$$z_A = \frac{1}{\alpha} \quad (2)$$

在 z_A 范围内, 约有 63% 的入射激光能量被吸收。如, 对 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光辐照皮肤, $z_A = 0.2 \text{ mm}$; 而 CO_2 激光照射皮肤, 则 $z_A = 0.02 \text{ mm}$ 。可见生物组织的吸收特性对波长选择的重要性。

辐照、吸收和产生热量是连续发生的过程。光吸收产生热可采用 Lambert-Beers 定律近似描述:

$$H(z) = -\frac{dI(z)}{dz} = \alpha I_0 \exp(-\alpha z) \quad (3)$$

式中 $H(z)$ 是单位体积内产生的热, 是深度 z 的函数。在皮肤表面, 200 W/cm^2 的激光产生的热, 对 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 大约是 10^3 W/cm^3 ; 而对 CO_2 激光是 10^5 W/cm^3 。在 2.0 mm 深度, $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光产生热为 368 W/cm^3 ; 而对 CO_2 激光不产生热。从以上数据表明, 不同波长激光产生不同的生物效应, CO_2 激光用于产生强而非穿透表面热, 即切割、气化组织; 而 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光用于在深处产生热, 即凝固。经过采用 Ar^+ 激光、 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 、 CO_2 激光和准分子激光等进行心肌打孔试验比较, 决定采用 CO_2 激光($10.6 \mu\text{m}$)较为合适。

二、光学设计

CO_2 激光器通常采用共焦腔或半共焦腔, 其输出的沿 z 轴方向传播的基模高斯光束为

$$\psi_{00}(x, y, z) = \frac{c}{W(z)} \exp\left(-\frac{r^2}{W^2(z)}\right) \exp\left\{-i\left[k\left(z + \frac{r^2}{2R}\right) - \arctan \frac{z}{f}\right]\right\} \quad (4)$$

式中 c 是常数因子,

$$r = x^2 + y^2, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad W_0 = \sqrt{\frac{\lambda f}{\pi}}, \quad f = \frac{\pi W_0^2}{\lambda},$$

$$R(z) = z + \frac{f^2}{z}, \quad W(z) = W_0 \left[1 + \left(\frac{z}{f}\right)^2\right]^{1/2}.$$

为了有效地将高斯光束聚焦应合理地选择 W'_0, W_0, l, l', F 等参数。图 1 给出了高斯光束的聚焦情形。

像方高斯光束腰斑的大小为:

$$\frac{1}{W_0'^2} = \frac{1}{W_0^2} \left(1 - \frac{l}{F}\right)^2 + \frac{1}{F^2} \left(\frac{\pi W_0}{\lambda}\right)^2 \quad (5)$$

当 $l \gg F$ 时, 有

$$W_0' \approx \frac{\lambda F}{\pi [W(l)]}; \quad l' \approx F \quad (6)$$

式中 $W(l)$ 为入射在透射表面上的高斯光束光斑半径, F 为透镜的焦距。若 l 还满足条件 $l \gg$

$f = \frac{\pi W_0^2}{\lambda}$, 则有

$$W'_0 \approx \frac{F}{l} W_0 \quad (7)$$

可以看到, 当 $l \gg F$, $l \gg f$ 时, 聚焦效果愈好。取 $F = \frac{1}{2} R$, R 为凹球面反射镜的曲率半径。

为了要打出细孔, 可加上限束光阑。

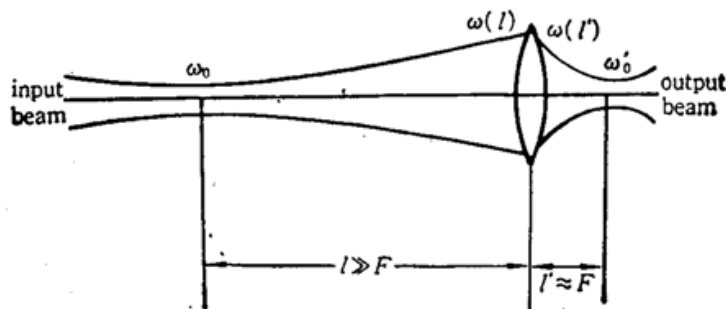


Fig. 1 The focusing of Gaussian beam

三、实验装置及材料

激光心肌打孔实验装置如图 2 所示。1 为腔片, 3、5 为光阑, 2 为凹球面反射镜, 4 为离体动物(狗、猪、羊)心脏, 6 为激光功率计。取 $R = 500 \text{ mm}$, $F = 250 \text{ mm}$ 。凹球面反射镜距 CO_2 激光器输出镜的距离 $l \sim 300 \text{ mm}$; α 角尽量小, 反射聚焦高斯光束参数近似不变。

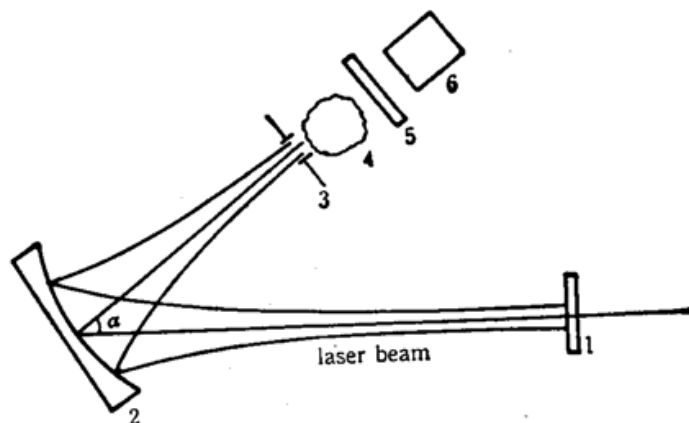


Fig. 2 The diagram of the experimental device for laser-punching in myocardium

四、实验结果与讨论

将已打出细孔的心脏先行冷冻, 然后切开测量染过色的孔深、孔径。在未加光阑时, 用激光功率计测 CO_2 激光器输出功率为 22 W 。孔深理论值按公式 $h = C(1 - \exp(-\tau t))$ 计算, 系数 C 和 τ 由实验条件决定。

当光阑孔径为 1 mm 时, 功率密度为 $1.2 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 。实验曲线如图 3 中 I 所示。理论计算, $h = 33.9(1 - \exp(-0.149t))$, 得到曲线 I' 。

当光阑孔径为 0.88 mm 时, 功率密度为 $2.4 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 。实验曲线如图 4 中 II 所示。理论计算, 由公式 $h = 36.4(1 - \exp(-0.129t))$, 得到曲线 II'。

对上述图 3、图 4 给出的 $h-t$ 关系曲线, 初步讨论如下:

(1) 在激光心肌打孔的开始阶段, 孔深增加较快, 随时间近似成线性关系, 曲线 I 的斜率为 $\sim 7 \text{ mm/s}$, 曲线 II 的斜率为 $\sim 7.5 \text{ mm/s}$; (2) 随着时间的增加, 孔深的增长速度逐渐缓慢, 并呈现饱和趋势; (3) 在饱和区, 心肌组织发生较严重的热损伤, 这要尽量避免的; (4) 经过血液渗透率试验, 表明轻微热损伤并不影响血液渗透率; (5) 从实验中得知, 工作在 $h-t$ 曲线的线性区域效果最好。通过提高 CO_2 激光功率密度, 缩短作用时间, 即可打出细孔 (孔径小于 0.5 mm, 孔深 10~30 mm); (6) 经过理论计算, 激光心肌打孔存在最佳激光参数选择。采用激光功率密度 $\sim 10^5 \text{ W/cm}^2$, CO_2 激光器输出功率为 80~90 W, 作用时间可缩短到 0.5 s 以下最为合适。为此, 我们已安装成 100 W 的准连续波 CO_2 激光心肌打孔实验装置。

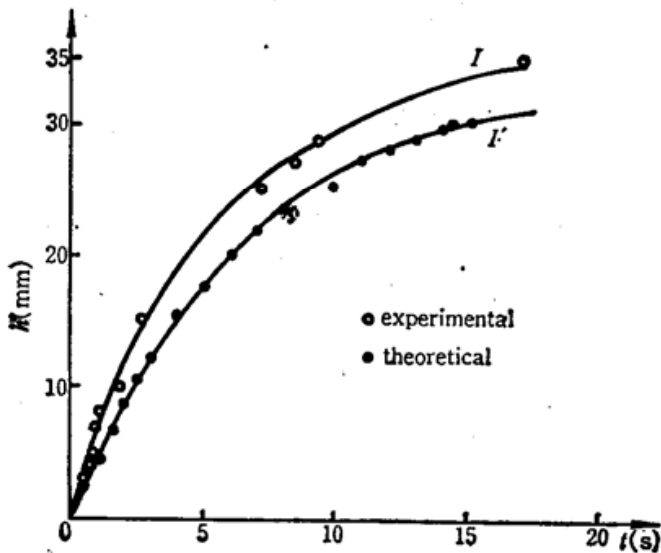


Fig. 3 Curves with laser punching in myocardium shows h and t dependence

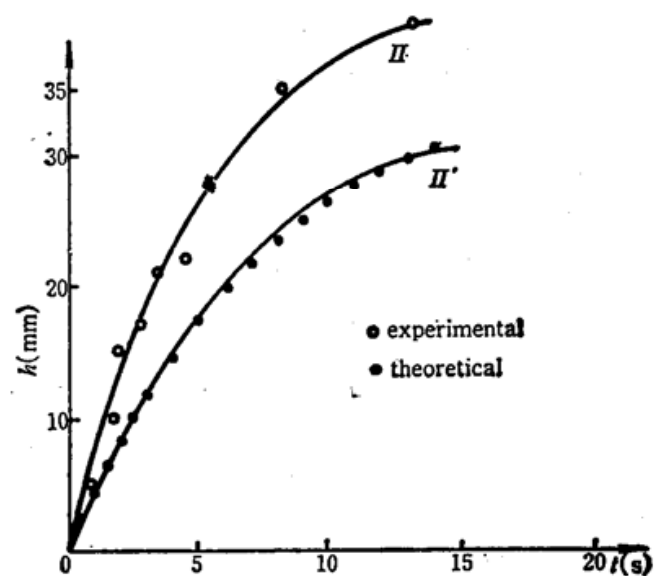


Fig. 4 Curve with laser punching in myocardium shows h and t dependence

参 考 文 献

- 1 W. S. Andras, *Laser & Applications*, 4 (2), 97 (1985)
- 2 岡田昌義; 胸部外科特集, 37 (2), 100 (1984)
- 3 Mirhoseini M. et al., *Laser Surg. Med.*, 3 (3), 241 (1983)
- 4 John C. Fisher. *Laser and Optoelektronik*, 18 (3), 229 (1986)
- 5 *Laser & Application*, 5 (11), 61 (1986)

(收稿日期: 1989 年 4 月 27 日)