

脉冲激光照射生物组织的压强效应

杨远龙 张晓天

(复旦大学物理系, 上海 200433)

Pressure effect of pulsed laser irradiation of tissue

Yang Yuanlong, Zhang Xiaotian

(Physics Department, Fudan University, Shanghai)

Abstract: By means of pulsed CO₂ laser irradiation of tissue, we have given here the relationship among the pressure effect, the cutting speed and the pulsed width. From calculation, we learned that the pressure effect are created inside the drilled hole due to the variation of recoil momenta of the evaporated molecules.

Key words: pulsed laser, pressure effect, recoil momentum

激光生物学效应的机理非常复杂。在激光照射下, 组织变性甚至被切割激光的热效应和

压强效应是两种最基本的效应。一般认为, 连续激光照射时主要是热效应^[1], 而脉冲激光照射时除了具有热效应外, 还存在压强效应。在入射能量为 E 的单脉冲激光照射生物组织的过程中, 受照的组织吸收了激光能量后被加热、继而气化。而在组织气化之前, 组织首先被激光熔化, 因而形成了气相、液相、凝聚相三相共存的状态, 见图 1。在气相和凝聚相中间的液相是瞬间形成的, 大约具有几十 μm 量级的厚度, 用符号 δ 来表示。气体分子反冲动量的变化所产生的压强把液体推向边缘的同时, 激光的热效应又把该部分液体蒸发、气化, 所以在达到稳态以后, 相位边界将以恒定的速度向深部组织移动。

文献 [2] 中用一维的气体动力学方程和气体状态方程来分析液相中的压强效应, 给出热效应引起的切割速度 \dot{Z}_T 为

$$\dot{Z}_T = \frac{I_0}{\rho_0 L_1} \quad (1)$$

式中: I_0 为入射脉冲激光的强度, ρ_0 为液相中的密度, 而

$$L_1 = \varepsilon_1 + \left(1 + \frac{\gamma}{2}\right) \cdot R^* T \quad (2)$$

式中 ε_1 是水的比能, $R^* = R'/\mu$ 是摩尔气体常数除以水分子的摩尔质量, $\gamma = 4/3$ 是水的比热比。于是

$$\dot{Z}_T = I_0 / \rho_0 \cdot \left[\varepsilon_1 + \left(1 + \frac{\gamma}{2}\right) \cdot R^* T \right] \quad (3)$$

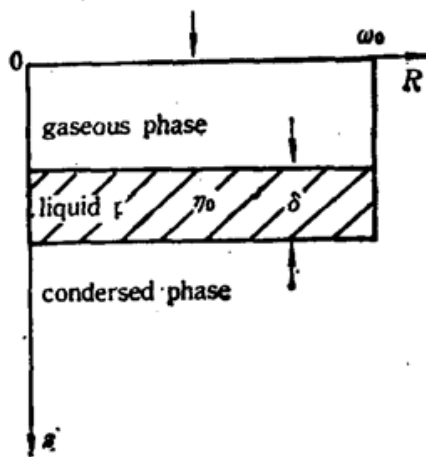


Fig. 1 Phase division boundary of tissue under the pulsed CO₂ laser irradiation. The gaseous and condensed phases are separated by a liquid layer of thickness δ and mean viscosity η_0

同时给出液相中的压强 p_0 为

$$p_0 = I_0 \frac{\sqrt{(R^*T)} \cdot (\sqrt{\gamma} + 1/\sqrt{\gamma})}{\left[\varepsilon_1 + \left(1 + \frac{\gamma}{2}\right) \cdot R^*T \right]} \quad (4)$$

但是(3)、(4)式都没有和脉冲激光器的脉冲宽度结合起来。如果我们假设脉冲激光器的脉冲宽度为 t , 入射截面积为 A , 则入射脉冲激光的强度 $I_0 = E/t \cdot A$ 。将 I_0 代入式(3), (4)得到

$$\dot{Z}_T = \frac{1}{A \rho_0 \left[\varepsilon_1 + \left(1 + \frac{\gamma}{2}\right) \cdot R^*T \right]} \cdot \frac{E}{t} \quad (5)$$

$$p_0 = \frac{\sqrt{(R^*T)} \cdot (\sqrt{\gamma} + 1/\sqrt{\gamma})}{A \cdot \left[\varepsilon_1 + \left(1 + \frac{\gamma}{2}\right) \cdot R^*T \right]} \cdot \frac{E}{t} \quad (6)$$

可见, 在液相中的压强 p_0 不仅与生物组织受热以后的温度有关, 而且与激光的脉宽成反比。这正如经典理论给出的, 压强与动量变化率成正比, 所以激光的脉宽越短, 则产生的压强 p_0 越大。这和医学临床上所遇到的结果一致。

由于压强效应的存在, 因此脉冲激光切割组织的速度来源于两部分的贡献。一部分是热效应速度 \dot{Z}_T , 另一部分是压力效应速度 \dot{Z}_p 。根据经典动力学理论, 压强效应对应的切割速度 \dot{Z}_p 为^[2]

$$\dot{Z}_p = \frac{dM/dt}{\rho_0 \cdot \pi R^2} = \frac{2\delta^2 p_{peak}}{\eta_0 \cdot \sqrt{e} \cdot w_0} \quad (7)$$

p_{peak} 是 $R=0$ 处的压强。在文章[2]的基础上, 我们计算得到

$$p_{peak} = \frac{\sqrt{(R^*T)} \cdot (\sqrt{\gamma} + 1/\sqrt{\gamma})}{A \cdot \left[\varepsilon_1 + \left(1 + \frac{\gamma}{2}\right) R^*T \right]} \cdot \frac{E}{t} \quad (8)$$

因此由(1), (7), (8)式得到脉冲激光照射生物组织总的切割速度 \dot{Z} 为

$$\begin{aligned} \dot{Z} &= \dot{Z}_T + \dot{Z}_p \\ &= \frac{1}{A \cdot \rho_0 \cdot \left[\varepsilon_1 + \left(1 + \frac{\gamma}{2}\right) R^*T \right]} + \frac{2\delta^2 \sqrt{(R^*T)} \cdot (\sqrt{\gamma} + 1/\sqrt{\gamma})}{A \cdot \eta_0 \cdot \sqrt{e} \cdot w_0 \cdot \left[\varepsilon_1 + \left(1 + \frac{\gamma}{2}\right) R^*T \right]} \cdot \frac{E}{t} \end{aligned} \quad (9)$$

我们以医疗中常用的脉冲 CO_2 激光器照射生物组织来说明脉冲激光的压强效应。生物组织对脉冲 CO_2 激光的吸收系数 $\alpha = 200 \text{ cm}^{-1}$, 散射系数 $\beta = 0$ 。我们在文章[1]中已详细讨论了激光的热效应。在脉冲能量 $E = 0.1 \text{ J}$ 的 CO_2 激光照射下, 计算得到在 $R=0, Z=0$ 处的温度 $T = 328^\circ\text{C}$ 。根据式(6)计算了在输入 0.1 J 能量条件下产生的压强与不同脉冲宽度的关系, 如图2所示。

根据式(9)计算了在输入 0.1 J 能量条件下切割速度与不同脉冲宽度的关系, 如图3所示。

脉冲 CO_2 激光照射生物组织的压强效应是一种比较显著的效应, 它起源于热运动分子的动量变化率。从图2看出, 在入射激光能量恒定时, 压强效应与激光的脉宽成反比。例如, 对于脉宽为 $100 \mu\text{s}$ 的激光, 它产生的压强为 $7.24 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, 近似为7个标准大气压, 脉宽缩短一倍, 则产生的压强增大一倍。激光的热效应和压强效应是两种同时存在的效应。从图3看出, 在入射能量恒定时, 切割速度与激光的脉宽成反比。液体的粘滞系数 η_0 与压强效应引起

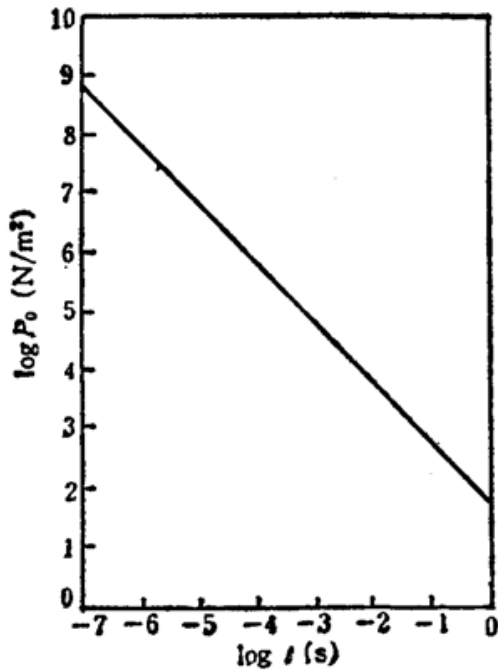


Fig. 2 Pressure effect of pulsed CO₂ laser against pulse duration

$$E=0.1\text{J}, w_0=0.2\text{cm}, \epsilon_1=4.18 \times 10^3 \text{J}^\circ\text{C}\cdot\text{kg}$$

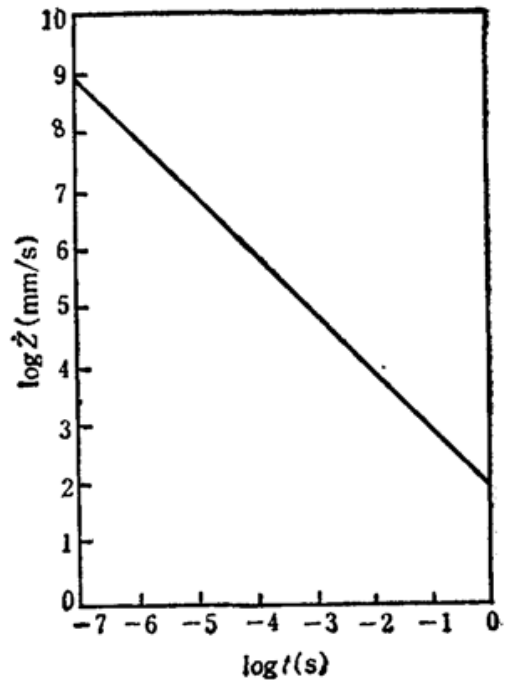


Fig. 3 Cutting velocity of pulsed CO₂ laser against pulse duration

$$E=0.1\text{J}, w_0=0.2\text{cm}, \epsilon_1=4.18 \times 10^3 \text{J}^\circ\text{C}\cdot\text{kg}$$

的切割速度 \dot{Z} , 密切相关, 因而是压强效应的一个重要物理量。

参 考 文 献

- 1 张晓天, 杨远龙, 中国激光, **16** (12), 745 (1989)
- 2 Adrian D. Zweig, Heinz P. Weber, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-23**(10), 1787 (1987)

(收稿日期: 1989年6月1日)

Na₅Tb(WO₄)₄ 晶体的光谱特性研究

姚 连 增

(中国科学技术大学材料系, 合肥 230026)

Studies on spectral properties of Na₅Tb(WO₄)₄ luminescent crystal

Yao Lianseng

(China University of Science and Technology, Hefei)

Abstract: In this paper, the successful growth of novel tetratungstate crystal, Na₅Tb(WO₄)₄, from a Na₂WO₄ flux is reported. The lattice parameters are calculated with the result of $a=1.1452\text{nm}$, $c=1.1364\text{nm}$, $c/a=0.9923$. Furthermore, the infrared, absorption, fluorescence and excitation spectra of Na₅Tb(WO₄)₄ crystal are measured.

Key words: luminescent crystal, spectral properties of crystal Na₅Tb(WO₄)₄