

组 别	激光功率 (W)	功率密度 (W/cm ²)	辐照时间 (s)	辐照剂量 (J/cm ²)	检查的 X 染色体数目	发生隐性致 死突变的 X 染色体数	频 度 (%)
辐照组	4.6	58.6	30	69.4	1200	8	0.67
对照组	0	0	0	0	1400	3	0.22

实验结果表明阴性对照组的隐性致死基因突变频度在自发突变范围内, 而受 CO₂ 激光辐照的一组的结果则明显高于自发突变率, 为后者的 3 倍。这表明 CO₂ 激光辐照引起果蝇 X 染色体的隐性致死突变明显增加。

以往用果蝇检测 He-Ne 激光、氩离子激光和氮分子激光辐照时没有发现隐性致死突变的增加^[4]。与本次实验结果不同。10.6 μm 的 CO₂ 激光属红外波段, 辐照效应主要是热效应。CO₂ 激光和其它激光一样具有良好的相干性, 机体组织吸收它后在很短时间内温度上升很高。这种热效应有可能使一些原子发生位置的改变, 形成异构分子, 从而引起突变^[5]。

目前医学临床使用的 CO₂ 激光功率范围为 5~80 W。本次实验所用激光功率(4.6)在其低限之下。由于果蝇在身体大小、形态结构、机体功能方面与人相距甚远, CO₂ 激光辐照方式以及受辐照面积等亦不同于医学临床, 以果蝇为材料的实验结果不能直接引伸到人。但是, 果蝇亦属真核生物, 其实验结果仍有参考价值。本次实验结果应引起医用激光工作者的重视, 对 CO₂ 激光的临床应用范围、辐照强度作慎重考虑。

参 考 文 献

- 1 广州中山医学院科仪厂医用激光组; 激光, 5(3), 56 (1977)
- 2 纪鍾, 群莅, 激光, 7(2), 11(1980)
- 3 国外激光, (5), 17 (1986)
- 4 庚镇城 *et al.*, 中国激光, 13(11), 720 (1986)
- 5 王 奇 *et al.*, 应用激光, (2), 47(1981)

(收稿日期: 1989 年 3 月 7 日)

Er:YAG 激光切除骨组织的定量研究

李兆璋

邵其璠

(上海第二医科大学激光医学研究室 200025)

(复旦大学物理二系, 200433)

Quantitative study of ablation of bone tissues by Er:YAG laser light

Li Zhaozhang

(Laser Division, Shanghai Medical University No. 2, Shanghai)

Shao Qiyun

(Dept. of Nuclear Science, Fudan University, Shanghai)

Abstract: Canine femurs were ablated with an Er:YAG laser (2.94 μm) with a pulse

duration of 250 μs . The bone ablation characteristics at four different pulse repetition rates (1-4Hz), were studied. The ablation depth versus energy density per pulse seems to follow an exponential function for large range of energy density. The increase of ablation ratio versus energy density at 1Hz was the highest, 2Hz the second, when the energy density levels were less than about 100J/cm.

Key words: Er:YAG laser, canine femurs

七十年代,二氧化碳激光作为外科手术刀已用于临床,激光切骨的基础研究也相继开展,如颌骨切除术、鼻泪囊造口术、上颌骨肿瘤切除术等^[1,2]。近年来,随着中红外激光器的研制,特别是超短脉冲激光技术的发展,Q-开关、锁模激光器等医学应用也得到了进一步探索。大量生物学研究表明,3 μm 中红外激光对各种组织(角膜、皮肤、动脉粥样硬化斑块、骨等)均有切除作用,它对邻近组织造成的热损伤,要比二氧化碳(CO₂)、氩离子(Ar⁺)、连续掺钕钇铝石榴石(Nd:YAG)激光所导致的轻^[3~4]。

本研究着重探讨Er:YAG激光在各种不同的脉冲重复频率之下,单脉冲能量密度与单脉冲切割深度的定量关系。根据实验数据按指定的数学模型拟合结果证实,在一定的照射能量密度范围内,单脉冲切割深度与单脉冲能量密度的对数成线性关系。

一、实验样品和方法

狗股骨切除实验是用脉冲持续时间为250 μs ,波长为2.94 μm 的Er:YAG激光器进行的。激光束用焦距为2.54cm的球面透镜聚焦,垂直照射到狗股骨样品上。选用离体新鲜狗股骨扁平区为照射区,受照前用未显影相纸确定激光的位置。切除面积由定标显微目镜测得,骨样品厚度用显微镜和微米计测量得到,单脉冲激光能量用RJ-7100型能量计测得。

整个实验是在较大的单脉冲能量密度范围内(2.9J/cm²~1238.0J/cm²)进行的,并且对四种不同脉冲重复频率(1~4Hz)进行了比较研究。第一组实验是选定一系列能量密度,每种能量密度照射骨组织直至刚穿透样品,记录下穿透脉冲数,然后用微米计测量骨的切除总深度。即可得到单脉冲激光的骨切除深度。第二组实验亦选择不同的能量密度,每种能量密度仅照10个脉冲,用同样方法可得单脉冲激光的骨切除深度。由于激光照射区域面积测量的误差,导致每次实验中单脉冲能量密度变化范围不可能完全一致。

所有实验数据的拟合分析均在内存为16兆字节的VAX-750型计算机上进行的,拟合程序用FORTRAN语言编制而成。

二、实验结果

图1及图2显示了第一组和第二组的实验数据及拟合分析结果,符号‘·’、‘+’、‘○’与‘×’分别代表1Hz、2Hz、3Hz与4Hz的实验结果。假定单脉冲切除深度为 x (以 μm 为单位),单脉冲能量密度为 y (以J/cm²为单位),它们之间满足

$$y = F_{th} \cdot \exp(\alpha x) \quad (1)$$

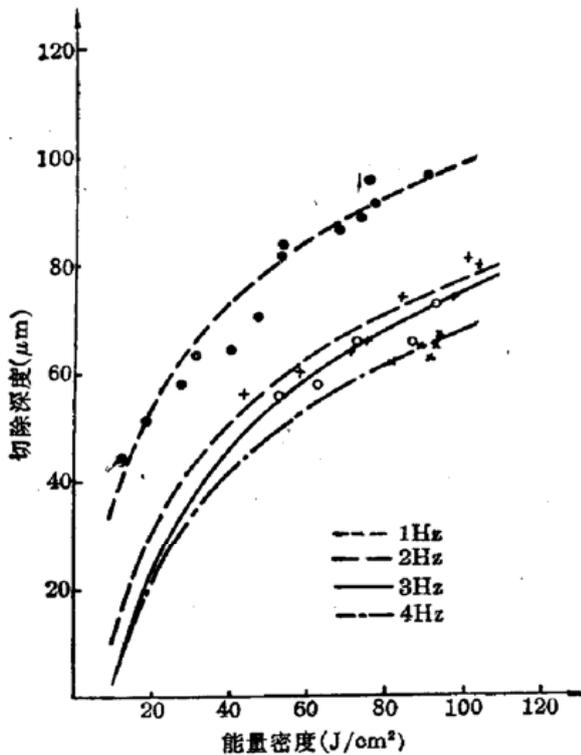


图1 Er:YAG 激光切除狗股骨第一组试验中单脉冲切除深度与能量密度的关系

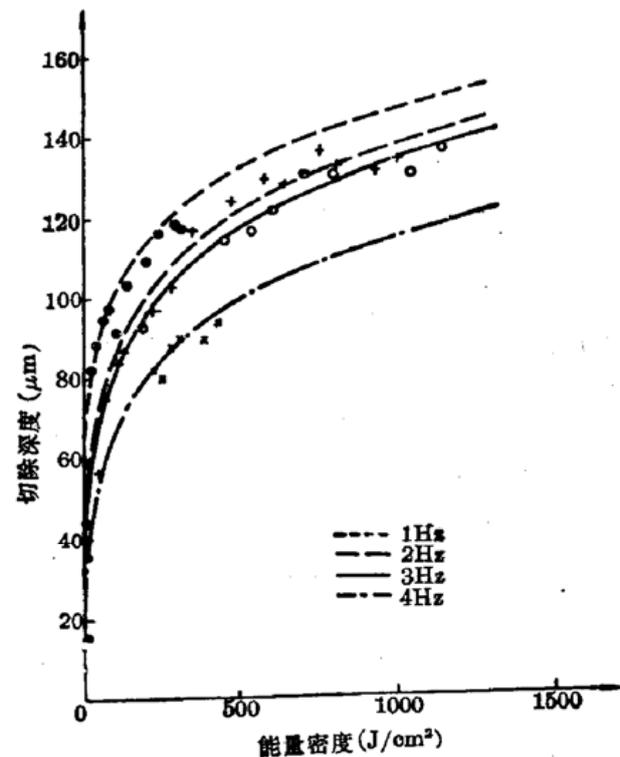


图2 Er:YAG 激光切除狗股骨第二组试验中单脉冲切除深度与能量密度的关系

表1 Er:YAG 激光骨切除数据

组别	单脉冲能量密度范围 (J/cm ²)	单脉冲切除阈值 F_{th} (J/cm ²)	有效吸收系数 α (cm ⁻¹)	相关系数 r
No. 1				
1Hz	10.9~89.1	3.049	354	0.97
2Hz	41.8~125.3	7.178	340	0.95
3Hz	50.9~91.1	9.559	313	0.95
4Hz	80.1~106.4	9.552	346	0.93
No. 2				
1Hz	2.9~341.1	0.807	486	0.98
2Hz	40.8~1166.4	3.141	417	0.95
3Hz	175.1~1238.0	3.857	412	0.96
4Hz	212.3~386.3	6.171	442	0.88

其中 F_{th} 为切除骨组织所需的单脉冲能量密度阈值, α 为介质对某波长光的有效吸收系数, 这里为骨组织对 $2.94 \mu\text{m}$ 激光的有效吸收系数。式(1)在数学上可改写成如下的对数形式:

$$\alpha = \frac{1}{F_{th}} \ln(y/F_{th}) \quad (2)$$

四种不同脉冲重复频率的两组实验数据, 经式(1)拟合后的结果列在表1中, 表1中的 r 值为判断拟合优度的相关系数。图1和图2中的四条曲线分别为1~4Hz的理论拟合曲线。从表1中可以看出, 在同一组的四个脉冲重复频率中, 1Hz的 F_{th} 为最低, 3Hz与4Hz的 F_{th} 比1Hz的高得多。样品照射后的显微镜观察可以发现, 在切除区周围有褐色的胶凝出现, 对1Hz和2Hz, 其周围的白色及棕色热损伤区宽度约为 $10 \sim 20 \mu\text{m}$, 而3Hz和4Hz则为 $200 \sim 250 \mu\text{m}$ 。可见1Hz及2Hz的热损伤要比3Hz及4Hz小得多。

三、讨 论

Bayly 等^[5]曾报道水在 $2.94\ \mu\text{m}$ 波长处的吸收系数为 $7700\ \text{cm}^{-1}$, 因而 $2.94\ \mu\text{m}$ Er:YAG 激光对含水量高的组织的切除作用是肯定的。对于骨组织的切除效应, 近年来少量的研究也表明是可行的。Nuss 等^[6]对含钙的基底致密的骨组织的光谱分析表明, 波长从 $2.7\ \mu\text{m}$ 至 $2.8\ \mu\text{m}$, 相对吸收系数在对数坐标上要提高 4 倍, 因此, 骨组织在 $2.94\ \mu\text{m}$ 处也有较大的吸收。本研究的结果也证实: 致密的狗股骨对 $2.94\ \mu\text{m}$ 激光有较大的吸收, 故它能在 $0.8\sim 9.5\ \text{J}/\text{cm}^2$ 单脉冲能量密度范围内被切除。其理由是骨组织除了含水外, 其中无机成分(如钙)的盐类及有机成分的胶原纤维, 在 $3\ \mu\text{m}$ 波长上均有较大的吸收峰, 正如[7]报道的那样。

本实验对四种不同脉冲重复频率的骨切除特性进行定量比较, 经按式(1)编制的计算机拟合程序分析表明: $1\ \text{Hz}$ 与 $2\ \text{Hz}$ 具有较低的单脉冲切除能量密度阈值。从图 2 明显看出在单脉冲能量密度 $2.9\sim 100\ \text{J}/\text{cm}^2$ 范围内, 脉冲重复频率为 $1\ \text{Hz}$ 时, 单脉冲切除深度随单脉冲能量密度的递增量为最大, $2\ \text{Hz}$ 时其次; 当单脉冲能量密度大于 $100\ \text{J}/\text{cm}^2$ 时, 四种脉冲重复频率的单脉冲切除率随单脉冲能量密度变化的情况基本都趋于很小。又考虑到 $1\ \text{Hz}$ 和 $2\ \text{Hz}$ 有较少的热损伤, 因此, $1\ \text{Hz}$ 或 $2\ \text{Hz}$ 是切骨术可选择的较佳脉冲重复频率。

此外, 从表 1 中给出的拟合结果表明, 大多数实验数据的回归分析, 都能得到满意的相关系数 r 值, 因此用数学式(1)描述单脉冲切除深度与单脉冲能量密度之间的关系是合适的。

本研究是在美国杜克(Duke)大学生物医学工程系 M. L. Wolbarsht 教授的指导下进行的, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Gardenr G, Robertson HJ *et al.*, *Am. J. Otolaryngol.*, **5**, 108~117 (1984)
- 2 施香荷, 谈松年 *et al.*, *应用激光*, **1** (6), 40 (1981)
- 3 Wolbarsht ML, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-20** (12), 1427~1432 (1984)
- 4 Bonner RF, Smith PD *et al.*, *Proc. SPIE*, **713**, 2~5 (1986)
- 5 Bayly JG, Kartha VB *et al.*, *Infrared Phys.*, **3**, 211~223 (1963)
- 6 Nuss RC, Fabian RL *et al.*, *Lasers Surg. Med.*, **8**, 381~391 (1988)
- 7 Doyle BB, Bendit EG *et al.*, *Biopolymers*, **14**, 937~967 (1975)

(收稿日期: 1989年3月7日)