

# 调 Q 和静态 Er:YAG 激光消融骨硬组织的研究

杨经纬<sup>1</sup> 江海河<sup>1,2</sup> 王 礼<sup>1</sup> 王金涛<sup>1</sup> 吴先友<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031  
<sup>2</sup> 中国科学院合肥物质科学研究院医学物理与技术中心, 安徽 合肥 230031

**摘要** 采用脉冲调 Q Er:YAG 激光和脉冲静态 Er:YAG 激光分别对离体猪股骨组织进行了消融实验。测量出两种模式的 Er:YAG 激光对猪股骨的消融阈值范围分别为 1.80~2.40 J/cm<sup>2</sup> 和 3.46~5.00 J/cm<sup>2</sup>, 结果显示调 Q Er:YAG 激光对离体猪股骨组织的消融阈值低。使用调 Q 激光与静态激光在重复率为 3 Hz, 脉冲能量为 200 mJ, 作用脉冲数为 15 次, 分别辐照于离体猪股骨组织, 利用扫描电子显微镜 (SEM) 观察骨组织消融出的坑状结构的形态变化。系统比较调 Q Er:YAG 激光与静态 Er:YAG 激光消融骨组织在切口表面形貌、微结构变化等方面的优劣, 同时在两种模式激光消融猪股骨组织过程中, 使用热像仪观察两种激光模式的激光消融骨组织对组织周围的温度分布。实验结果表明调 Q Er:YAG 激光消融猪股骨的消融效率高、切缝光滑且对周围组织细胞的热损伤小。因此, 调 Q Er:YAG 在猪股骨组织消融过程中具有显著的优势。

**关键词** 激光技术; Er:YAG 激光; 调 Q; 骨硬组织; 消融

中图分类号 R318.51 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.s104001

## Study on Ablation Hard Tissue Using Q-Switched Er:YAG Laser and Free-Running Er:YAG Lasers

Yang Jingwei<sup>1</sup> Jiang Haihe<sup>1,2</sup> Wang Li<sup>1</sup> Wang Jintao<sup>1</sup> Wu Xianyou<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China  
<sup>2</sup> Center of Medical Physics and Technology, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Science, Hefei, Anhui 230031, China

**Abstract** Q-switched Er:YAG laser and free-running Er:YAG laser are used to study the laser ablation for the fresh porcine thighbones tissue *in vitro*. The ablation threshold range of the Q-switched laser and the free-running laser are 1.80~2.40 J/cm<sup>2</sup> and 3.46~5.00 J/cm<sup>2</sup>, respectively. The results indicates that the ablation threshold of the Q-switched laser is lower. The fresh porcine thighbones tissue *in vitro* is irradiated by the two laser modes under the conditions of repetitive rate of 3 Hz, pulse energy of 200 mJ, and pulse number of 15 times. In addition, the morphologic changes of the tissue crater are observed by a scanning electron microscope (SEM). The morphology and the microstructure of the incision surface of the tissue ablated by the two laser modes are compared. Meanwhile, in the process of laser ablation, temperature distribution of the irradiation region with the two lasers for the tissue is measured by thermal infrared imager. Results show that after laser ablation for the tissue by the Q-switched laser, the lancing is smooth and the thermal damage for the surrounding histocyte is slight. Thus, in the process of the laser ablation for the porcine thighbones tissue *in vitro*, the Q-switched laser has a significant advantage.

**Key words** laser techniques; Er:YAG laser; Q-switched; bone tissue; ablation

**OCIS codes** 170.1020; 170.1420; 170.6930

收稿日期: 2013-08-01; 收到修改稿日期: 2013-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(61275118)、国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合基金(U1230131)、中国科学院知识创新工程重点方向项目(KJJC2-EW-NO7)

作者简介: 杨经纬(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事激光技术方面的研究。E-mail: yjw480@gmail.com

导师简介: 江海河(1961—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事激光物理、激光技术、激光加工、激光医疗、信息获取与处理、光电测量等方面的研究。E-mail: hjiang@aiofm.ac.cn

## 1 引言

目前外科手术中,对骨骼等生物硬组织的修复及切割仍然使用电锯、电钻、骨凿等传统手术器械,传统的手术器械在使用过程中具有噪声大、组织切缝宽、机械损伤严重等问题,会延长组织愈合时间,进而增加病人痛苦<sup>[1-2]</sup>。同时,操控这些传统手术器械的精准程度取决于操作者的熟练程度,这也增加了手术的难度。随着激光技术的发展,激光以其独特的优势逐渐取代传统的手术器械。与传统手术器械相比,激光的非接触方式治疗可以避免接触式感染和机械损伤,激光光束还可以进行任意几何形状的切割,最大限度地降低对周围健康细胞组织的破坏,此外激光还具有止血、无菌等特点<sup>[3]</sup>。因此对生物硬组织进行激光消融的实验研究具有重要意义。

激光消融硬组织的原理是激光能量被组织快速吸收进而转化为热能,产生高温使连接组织成分被快速气化,其产生的气流去除组织中的磷灰石微晶<sup>[3-7]</sup>。Er:YAG激光晶体可以产生 $2.94\ \mu\text{m}$ 激光,该激光波长接近水吸收红外线峰值,激光能量能够被硬组织中的水分子和有机成分强烈吸收,可以有效地消融硬组织细胞<sup>[8]</sup>。相比于其他波长激光,该波长激光更适用于生物硬组织的消融。因此 $2.94\ \mu\text{m}$ 激光在整形外科手术、骨骼及牙齿修复切割等方面有着重要的应用价值。目前临床应用都是脉宽几百微秒的静态Er:YAG激光,作用于患处易产生热损伤,且静态激光峰值功率低,作用于骨骼的深度浅,在骨骼切割过程中必须增加脉冲激光次数来增加切割深度,容易造成患处热损伤加剧导致附近组织细胞坏死<sup>[9-11]</sup>。调Q Er:YAG激光具有峰值功率高,脉宽短(纳秒级)的特点,可以很好地解决目前静态Er:YAG激光消融骨骼出现的热损伤问题。

本文以离体猪股骨组织为实验对象,使用调Q Er:YAG激光和静态Er:YAG激光分别辐射离体猪股骨组织,开展消融实验研究,获得两种模式下的激光对猪股骨的消融阈值,同时考察硬组织消融的表面形态和结构变化,比较两种模式激光消融骨组织产生的消融坑状结构及其周围组织的温度特征。相比于静态Er:YAG激光,实验结果显示调Q Er:YAG激光在消融猪股骨的过程中具有消融阈值低、消融效率高和热损伤范围小的优势。

## 2 实验设置

实验样品为新鲜的离体猪股骨组织,通过切除周

围软连接组织,利用砂纸刮擦样品表面,使其表面相对平滑,然后用浸泡过生理盐水的纱布包裹好样品,冷藏直至使用。激光辐照前,使样品温度恢复至室温。

激光光源为自行研制的调Q Er:YAG激光系统,波长为 $2.94\ \mu\text{m}$ ,具有静态和调Q两种可切换的激光模式。实验装置如图1所示,激光从激光器中产生,光束经过 $45^\circ$ 全反镜反射,经过聚焦透镜( $f=50\ \text{mm}$ )聚焦垂直入射到样品表面,聚焦后光斑直径为 $1\ \text{mm}$ 。样品置于一维移动平台上,样品表面在聚焦镜焦点处。

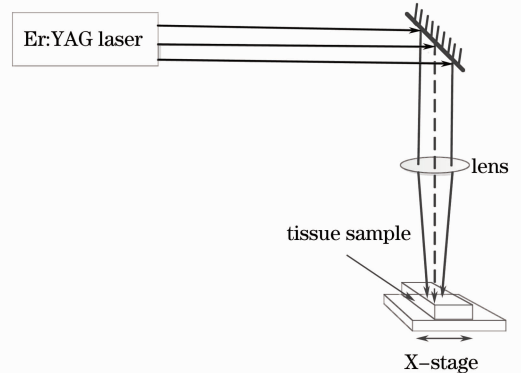


图1 实验装置图

Fig.1 Schematics of experimental setup

## 3 结果与讨论

### 3.1 消融阈值测量

首先利用不同脉冲能量的调Q Er:YAG激光和静态Er:YAG激光辐照猪股骨组织,通过扫描电镜(SEM)观察在不同脉冲能量密度下激光消融样品组织产生的形态变化。扫描电镜观察到调Q Er:YAG激光和静态Er:YAG激光消融样品组织的形状呈坑状结构,坑状边缘不规则。调Q Er:YAG激光在能量密度为 $1.80$ 、 $2.40$ 、 $3.07\ \text{J}/\text{cm}^2$ 下消融猪股骨组织后的结构图片如图2所示,当调Q激光能量密度为 $1.80\ \text{J}/\text{cm}^2$ 辐照在样品组织上,样品组织表面发生局部消融,如图2(a)所示,当增加能量密度到 $2.40\ \text{J}/\text{cm}^2$ 时,消融痕迹更加明显,样品组织表面消融的概率超过 $80\%$ ,如图2(b)所示,当能量密度增加到 $3.07\ \text{J}/\text{cm}^2$ 时,样品组织消融痕迹明显,如图2(c)所示。因为生物学物质存在较大差异性,故很难将其消融概率精确至 $100\%$ ,因此定义消融的发生概率为 $80\%$ 判定<sup>[12]</sup>,调Q Er:YAG激光对猪股骨组织的消融阈值范围在 $1.80\sim 2.40\ \text{J}/\text{cm}^2$ 。同理,静态激光能量密度为 $3.46$ 、 $5.00$ 、 $7.30\ \text{J}/\text{cm}^2$ 的消融结构图片如图3所示,依据上述判断原则,判定静

态 Er:YAG 激光对样品组织的消融阈值范围在 3.46~5.00 J/cm<sup>2</sup>。实验结果显示调 Q 激光对猪股

骨组织的消融阈值更低,这主要是因为调 Q 激光具有高峰值功率,有利于激光对骨硬组织的消融。

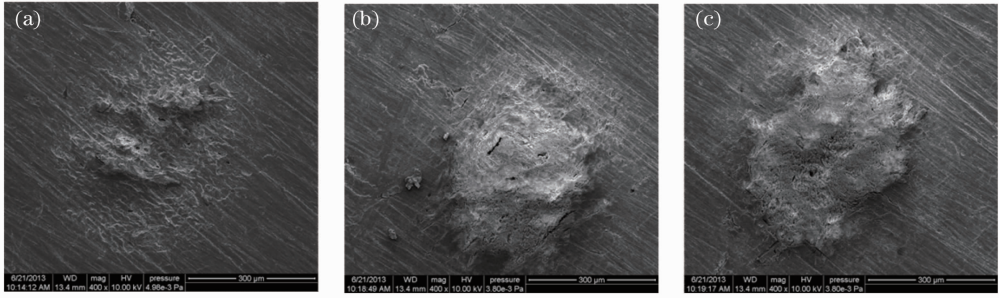


图 2 调 Q Er:YAG 激光在不同能量密度下消融猪股骨组织的扫描电镜图。

(a) 1.80 J/cm<sup>2</sup>; (b) 2.40 J/cm<sup>2</sup>; (c) 3.07 J/cm<sup>2</sup>

Fig. 2 SEM images of porcine thighbones tissue for Q-switched Er:YAG laser. (a) 1.80 J/cm<sup>2</sup>; (b) 2.40 J/cm<sup>2</sup>; (c) 3.07 J/cm<sup>2</sup>

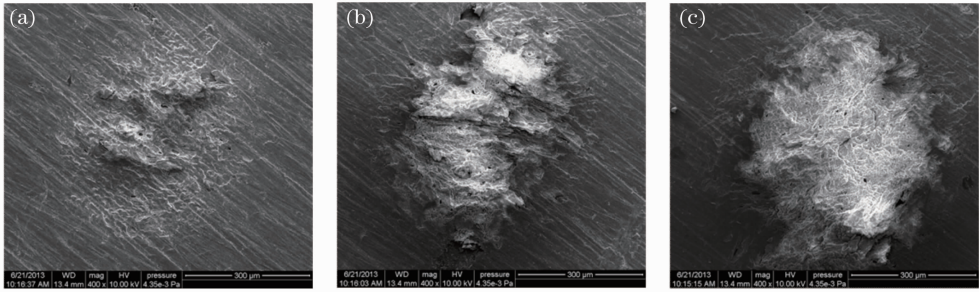


图 3 静态 Er:YAG 激光在不同能量密度下消融猪股骨组织的扫描电镜图。(a) 3.46 J/cm<sup>2</sup>; (b) 5.00 J/cm<sup>2</sup>; (c) 7.30 J/cm<sup>2</sup>

Fig. 3 SEM images of porcine thighbones tissue for free-running Er:YAG laser. (a) 3.46 J/cm<sup>2</sup>; (b) 5.00 J/cm<sup>2</sup>; (c) 7.30 J/cm<sup>2</sup>

### 3.2 消融坑状微结构

使用调 Q 激光与静态激光在重复率为 3 Hz,脉冲能量为 200 mJ,调 Q 激光脉宽为 65 ns,峰值功率为 3.08 mW,静态激光脉宽为 200 μs,峰值功率为 1 kW,作用脉冲数为 15 次,两种模式的激光分别辐照于样品组织。两种模式下的激光辐照的光斑区域中央都发生爆破,在表面形成类似圆形的消融坑状结构。在消融现象发生过程中,观察到疑为骨组织细屑的飞溅物和火花,其中调 Q 激光对放置于空气

中的样品进行消融时会有明显的蓝白色等离子光产生,该现象主要是因为调 Q 激光具有高峰值功率的特点,在峰值功率达到一定程度时,与样品作用过程中会产生等离子体,该现象在文献[12]中有过相关报道。两种模式的激光消融出的坑状结构分别用扫描电镜观察坑状正面和剖面,如图 4 和图 5 所示。调 Q Er:YAG 激光消融的坑状表面呈鳞片状,坑壁表面光滑,无碳化现象,且坑洞的深度要比静态激光消融的深。静态激光下产生的坑状结构表面及坑壁

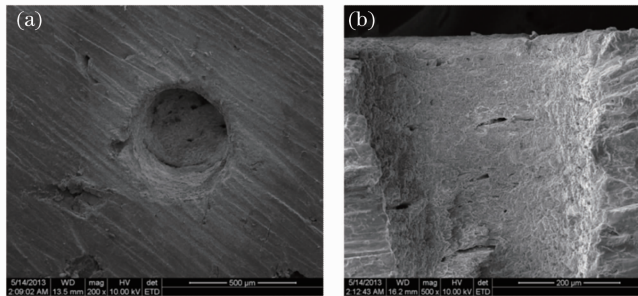


图 4 猪股骨调 Q Er:YAG 激光消融特征的扫描电镜图。(a) 正视图; (b) 剖视图

Fig. 4 SEM images of the porcine thighbones tissue for Q-switched Er:YAG laser ablation. (a) Front view; (b) cutaway view

有碳化现象,坑壁表面不光滑,坑壁上有熔融物。从实验结果可以看出调 Q 激光相对静态激光在消融效率上具有显著优势,这是因为调 Q 激光的峰值功率要高于静态激光,调 Q 激光的消融效率要大于静态激光。同时调 Q 激光脉宽短,与骨组织的作用时

间短,激光能量向周围组织辐射的能量少,因此调 Q 激光消融的坑状表面光滑无碳化现象;而静态激光脉宽长,与骨组织作用时间长,过多的激光能量向周围组织辐射,导致坑壁表面有熔融物和碳化物产生。

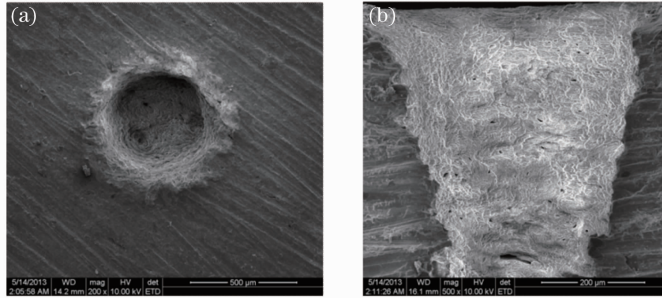


图 5 猪股骨静态 Er:YAG 激光消融特征的扫描电镜图。(a) 正视图; (b) 剖视图

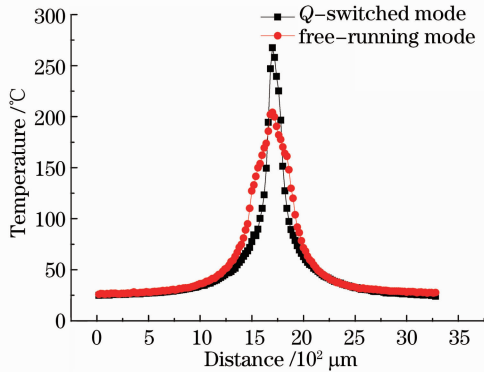
Fig. 5 SEM images of the porcine thighbones tissue for free-running Er:YAG laser ablation.

(a) Front view; (b) cutaway view.

### 3.3 坑状周围组织温度分布

在两种不同模式激光辐照离体猪股骨组织过程中,使用 InfraTec VH-620 红外热像仪测量出两种模式下激光辐照在样品组织辐照区及周围组织的温度分布。图 6 为调 Q Er:YAG 激光和静态 Er:YAG 激光辐照样品组织温度分布图。经过两种模式的 Er:YAG 激光辐照后,调 Q Er:YAG 激光辐照点对应的峰值温度为 267.4 °C,静态 Er:YAG 激光的辐照点峰值温度为 204.12 °C,比调 Q 激光的辐照点峰值温度低 63.28 °C;从图中还可以看出静态激光辐照样品高温区范围明显大于调 Q 激光辐照样品的高温范围。实验结果表明,辐照点的峰值温度决定于激光的脉冲能量和脉宽,当脉冲能量一定时,短脉宽(调 Q 激光)激光的峰值功率高,辐照于样品组织时可使辐照区组织迅速升温达到相变的温

度,有利于组织消融的进行,同时短脉宽激光脉宽短(纳秒级),使得激光作用于组织的时间短,使得在激光辐照过程中高温范围尽可能小,有效地避免多余的热量扩散到周围组织,进而抑制周围组织细胞热损伤的发生;静态激光的峰值功率低,因此对组织的消融效率相对较低,同时静态激光脉宽较长(毫秒级),在激光辐照过程中激光与组织的接触时间长,使得多余的热量扩散到周围组织结构中,在消融样品过程中易引发组织周围温升,造成周围组织热损伤。



## 4 结 论

采用脉冲调 Q Er:YAG 激光和脉冲静态 Er:YAG 激光分别对离体猪股骨组织进行了消融实验。获得两种模式的 Er:YAG 激光对猪股骨的消融阈值范围分别为 1.80~2.40 J/cm<sup>2</sup> 和 3.46~5.00 J/cm<sup>2</sup>,调 Q Er:YAG 激光对样品组织的消融阈值低。使用调 Q 激光与静态激光在重复率为 3 Hz,脉冲能量为 200 mJ,作用脉冲数为 15 次,分别辐照离体猪股骨组织,利用扫描电镜观察样品辐照区产生的坑状结构形态变化,同时在两种模式激光消融样品组织过程中,使用热像仪观察激光消融样品组织及其周围组织的温度分布,实验结果表明调 Q Er:YAG 激光消融样品组织的坑状表面结构光滑、消融速率高且对周围组织细胞的热损伤小。因此调 Q Er:YAG 在猪股骨组织消融过程中具有显著的优势,同时还开展调 Q Er:YAG 激光消融人体骨骼、牙齿、皮肤等相关实验,结果会在相关的杂志发表。此研究成

图 6 调 Q Er:YAG 激光与静态 Er:YAG 激光辐照猪股骨组织温度分布图

Fig. 6 Temperature distribution of the dentine irradiated by Q-switched laser and free-running laser

果将有助于进一步了解调 Q Er:YAG 激光对硬组织的消融特性，为临床应用提供参考。

### 参 考 文 献

- 1 Zhang Xianzeng, Wang Xiaoyan, Zhan Zhenlin, *et al.*. Comparison of skull tissue ablation with pulse CO<sub>2</sub> and Er:YAG lasers[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(10): 2577-2581.  
张先增, 王晓燕, 詹振林, 等. 脉冲 CO<sub>2</sub> 激光与 Er:YAG 激光颅骨组织消融的比较[J]. 中国激光, 2009, 36(10): 2577-2581.
- 2 Lü Tao, Xiao Qing, Li Zhengjia. Analysis of ablation efficiency of holmium laser pulses for urinary calculus under various environments[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(s1): s100414.  
吕涛, 肖青, 李正佳. 钬激光脉冲不同条件下消融泌尿结石效率分析[J]. 光学学报, 2010, 30(s1): s100414.
- 3 Zhan Xianzeng, Guo Jian, Zhan Zhenlin, *et al.*. Water spray-assisted ablation of bone hard tissue with pulsed CO<sub>2</sub> laser[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(7): 2069-2073.  
张先增, 郭健, 詹振林, 等. 脉冲 CO<sub>2</sub> 激光伴水喷雾的骨组织消融[J]. 光学学报, 2010, 30(7): 2069-2073.
- 4 H Lee, H W Kang, J M H Teichman, *et al.*. Urinary calculus fragmentation during Ho:YAG and Er:YAG lithotripsy[J]. Lasers in Surgery and Medicine, 2006, 38(1): 39-51.
- 5 R C Nuss, R L Fabian, R Sarkar, *et al.*. Infrared laser bone ablation[J]. Lasers in Surgery and Medicine, 1988, 8(4): 381-391.
- 6 Zhang Jizhuang, Zhang Xuexue. Effect factors of laser tissue ablation[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(2): 300-304.

- 张纪庄, 张学学. 激光蚀除生物组织的影响因素[J]. 中国激光, 2007, 34(2): 300-304.
- 7 Jiang Fagang, Yang Xiaobo, Dai Nengli, *et al.*. Femtosecond laser photodisruption in the rabbit sclera[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(12): 1699-1703.  
姜发纲, 杨晓波, 戴能利, 等. 飞秒激光对离体兔巩膜的光离解作用[J]. 中国激光, 2006, 33(12): 1699-1703.
- 8 S Stübinger. Advances in bone surgery; the Er:YAG laser in oral surgery and implant dentistry [J]. Clinical, Cosmetic and Investigational Dentistry, 2010, 2(8): 47-62.
- 9 B Majaron, D Šušterčič, M Lukač, *et al.*. Heat diffusion and debris screening in Er:YAG laser ablation of hard biological tissues[J]. Applied Physics B: Lasers and Optics, 1998, 66(4): 479-487.
- 10 T Dostálová, H Jelínková, M Nemeč, *et al.*. Er:YAG laser micro-preparation of hard dental tissue[C]. SPIE, 2007, 6425: 64250G.
- 11 J A Izatt, D Albagli, M Britton, *et al.*. Wavelength dependence of pulsed laser ablation of calcified tissue[J]. Lasers in Surgery and Medicine, 1991, 11(3): 238-249.
- 12 Lin Shi, Peng Qiming, Zhan Zhenlin, *et al.*. Study of the ablation threshold of Er:YAG and Er,Cr:YSGG laser dental enamel[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(10): 2598-2602.  
林实, 彭奇明, 詹振林, 等. Er:YAG 激光和 Er,Cr:YSGG 激光消融牙釉质的阈值研究[J]. 中国激光, 2009, 36(10): 2598-2602.

栏目编辑: 韩峰