

文章编号: 0253-2239(2010)s100414

钬激光脉冲不同条件下消融泌尿结石效率分析

吕涛^{1,2} 肖青¹ 李正佳¹

(¹华中科技大学光电科学与工程学院, 武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)

²中国地质大学(武汉)数理学院, 湖北 武汉 430074

摘要 由于光纤传输脉冲钬激光在液体环境条件下消融生物组织时首先在光纤端面产生空化效应,因此液体动力学效应直接决定激光消融生物组织的作用机理。采用自由运转钬激光[脉冲半峰全宽(FWHM)300 μs,波长2.12 μm]在水中和在空气中消融一水草酸钙和尿酸结石,消融后的凹坑表面形貌利用光学弱相干显微成像(OCM)系统进行精确量化,从而实现对凹坑的表面直径、高度和体积的精确测量。实验结果表明,相同能量的多个脉冲作用时,消融后的凹坑表面形貌差异较大,在液体中作用比在空气中作用具有更高的消融效率,液体在激光与物质相互作用进程中起着促进作用。

关键词 生物光学;钬激光脉冲;空化泡;激光消融;生物组织

中图分类号 R318.51 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201030.s100414

Analysis of Ablation Efficiency of Holmium Laser Pulses for Urinary Calculus Under Various Environments

Lü Tao^{1,2} Xiao Qing¹ Li Zhengjia¹

(¹ Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, College of Optoelectronics Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

² School of Mathematics and Physics, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract Cavitation effect induced by holmium laser pulses firstly happens when fiber-transmitted holmium laser pulses ablate biological tissues under liquid environment. Then liquid thermodynamics can directly determine the overall mechanisms of laser-tissue interaction. Free-running holmium laser pulses with pulse duration of 300 μs [full width at half-maximum (FWHM)] and wavelength of 2.12 μm are used to ablate calculus consisting of calcium oxalate monohydrate (COM) and uric acid (UC) constituents. After irradiation the crater tomographic image is measured by optical coherent microscopy (OCM) technology to quantify width, height, and volume. Experimental results indicate after multi-pulse irradiation with the same energy of a single pulse, the difference of the surface tomography is much more obvious. The ablation efficiency in water is much higher than that in air. This indicates that liquid can contribute to the laser-substance interaction.

Key words bio-optics; pulsed holmium laser; cavitation bubble; laser ablation; biological tissue

OCIS codes 060.2390; 140.3390; 170.6920

1 引 言

波长为 2.12 μm 的钬激光能够被生物组织中的水大量吸收(吸收系数为 30 cm⁻¹,消光长度约为

333 μm)并且能经低 OH⁻ 石英光纤传输^[1],所以目前广泛运用于整形外科、泌尿外科、眼科和妇科等临床医学^[2~6]。自由运转长脉冲钬激光在临床医学运

收稿日期: 2010-08-20; **收到修改稿日期**: 2010-10-22

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(CUG090112)和国家自然科学基金青年基金(61008054)资助课题。

作者简介: 吕涛(1977—),男,博士研究生,讲师,主要从事激光医学和光纤传感器等方面的研究。

E-mail: lvtaohn@sina.com

导师简介: 李正佳(1945—),男,教授,博士生导师,主要从事固体激光器和激光医学等方面的研究。

E-mail: zhjli@mail.hust.edu.cn(通信联系人)

用中如果工作于液体环境条件下,单个钬激光脉冲与生物组织作用前首先要与间隙处的液体相互作用,高能脉冲激光诱导液体发生空化效应即在光纤端面产生空化泡,由于空化泡对钬激光的吸收要比水对钬激光的吸收要小得多,后续的激光脉冲能够以较小损耗地穿透空化泡直接作用于生物组织上,所以空化泡的动力学性质直接决定钬激光与生物组织作用的机理。当钬激光脉冲空气中作用于生物组织时,其消融效果与在液体环境条件下的消融效果明显不同,产生的原因是消融的机理不同。

当脉冲激光作用于生物硬组织上时通常会形成不同深度和表面直径的凹坑,为了评估不同波长、能量和工作条件下的消融效率及消融副作用,传统的检测方法采用无损伤的光学弱相干层析成像(OCT)系统($\lambda_0 = 1290 \text{ nm}$, $\Delta\lambda = 42 \text{ nm}$ 和 $P = 2.2 \text{ mW}$),其轴向测量精度为 $20 \mu\text{m}^{[7\sim 10]}$ 。

本文主要研究自由运转长脉冲钬激光在空气中和在水中接触式消融泌尿系结石,并依靠光学弱相干显微成像(OCM)系统测量激光消融后的结石样品,以客观评价钬激光脉冲在不同条件下消融生物硬组织性能差异及差异产生的原因。

2 实验及结果

武汉光电国家实验室自行研制的钬激光器工作波长为 $2.12 \mu\text{m}$,脉冲半峰全宽(FWHM)为 $300 \mu\text{s}$,单个脉冲最大能量超过 2 J ,重复频率最大为 40 Hz 。图1为工作频率为 5 Hz 的钬激光脉冲作用在相纸上的光斑结果图,相纸与激光输出端间距约 25 cm ,可见单个脉冲光斑半径约为 5 mm 左右。图2为用红外透镜耦合钬激光进入 $600 \mu\text{m}$ 芯径低 OH^- 石英光纤后当光纤端面间距相纸 0.5 mm 时激光脉冲作用的光斑示意图。由图可见,光斑中心能量较边缘更集中,中心区已经被碳化。

图3为利用OCM系统(中心波长 650 nm ,轴向精度 $2 \mu\text{m}$,10倍物镜)测量得到的在不同条件下(在空气中和在水中)经 $600 \mu\text{m}$ 光纤传输频率为 1 Hz 的10个连续钬激光脉冲消融相同成分(一水草酸钙和尿酸)泌尿系结石后表面形貌图。可见,在水中的消融的深度 $h = 351 \mu\text{m}$ 大于在空气中 $h = 255 \mu\text{m}$,表面直径 w 分别为 $400 \mu\text{m}$ 和 $372 \mu\text{m}$,由此可知,前者消融的体积大于后者消融的体积,结果前者的消融效率高于后者的消融效率。此外,由图3(a)和(c)可见,在空气中消融后凹坑表面光滑度要低于在水中消融后凹坑表面光滑度,这充分证明水在激光与物质相互作用进程中除能提高消融效率外还可提高表面光滑度。



图1 未用光纤耦合的钬激光脉冲光斑图
Fig. 1 Thermal images of the holmium laser spot without fiber coupler



图2 用光纤耦合的钬激光脉冲光斑示意图
Fig. 2 Thermal images of the holmium laser spot with fiber coupler

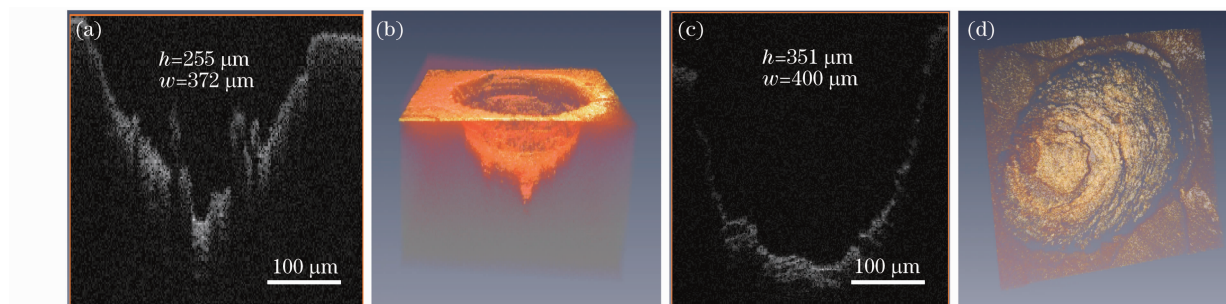


图3 光纤传输钬激光消融结石后结果图。(a),(b)在空气中,(c),(d)在水中,(a),(c)为二维图,(b),(d)为三维图
Fig. 3 Cross-sectional topographic images of Ho:YAG laser-induced craters acquired with OCM technology in air and water for core diameter fiber. (a), (b) in air, (c), (d) in water, (a), (c) 2D image, (b), (d) 3D image

3 讨 论

在液体中作用于生物组织通常是由光纤传输的脉冲激光作用产生,外界的水深越深对光纤端面诱导产生的空化泡及消融物的约束力越强,相对空气而言水的热传导系数要更小,最终会提高光机械和光热能量转换效率(从而提高消融效率)且对周围组织的热损伤范围更小。与空气中作用类似,在水中作用时通常在激光脉冲作用未结束时有消融物的出现,因此后续出现的空泡成分某个时间段内包含有消融物,这些混合物对后续脉冲激光作用时会产生一定的负面影响,因而会增大对后续激光的屏蔽系数,从而降低消融效率。与在空气中作用相比,因为更高的能量耦合效率,所以单个激光脉冲水下作用于组织时,相同条件下产生的凹坑直径和深度均比在空气中产生凹坑直径和深度大,表面质量也更光滑。表面质量提高的原因为:1)激光诱导空化泡急剧膨胀或闭合时促使凹坑内有限的水沿着凹坑壁向外或向外高速流动,高速的水流会对凹坑壁上凸出物进行“冲洗”;2)空泡闭合后辐射的冲击波信号会对凹坑壁上凸出物产生冲击力;3)后续激光诱导的消融物与凹坑壁上凸出物相互碰撞。总之,相同条件下,光纤传输脉冲激光消融生物组织时水中消融的效果肯定要优于空气中消融的效果。

4 结 论

对于相同激光参数和相同成分的泌尿结石而言,光纤传输脉冲钬激光在液体环境条件下比在空气中消融生物组织时具有更高的消融效率、较低的

热效应损伤、增加消融凹坑表面的光滑度以及缩短作用时间等优良性能。中红外长脉冲激光在临床手术运用中可以工作在液体环境条件下以达到最优的手术性能,尽可能满足临床应用的需要。

参 考 文 献

- 1 O. Fohn, H. S. Pratisto, F. Konz *et al.*. Side-firing fiber device for underwater tissue ablation with Ho:YAG and Er:YAG laser radiation[J]. *J. Biomed. Opt.*, 1998, **3**(1): 112~122
- 2 G. S. Fanton, M. F. Dillingham. The use of the holmium: YAG-laser in arthroscopic surgery [J]. *Seminars in Orthopaedics*, 1992, **7**(4): 102~116
- 3 H. Pratisto, M. Frenz, M. Ith *et al.*. Temperature and pressure effects during erbium laser stapedotomy[J]. *Lasers Surg. Med.*, 1996, **18**(1): 100~108
- 4 J. M. Krauss, C. A. Puliafito. Lasers in ophthalmology[J]. *Lasers Surg. Med.*, 1995, **17**(2): 102~159
- 5 M. Kautzy, M. Susani, P. Schenk. Holmium: YAG infrared laser and UV-Excimer. Laser effekte auf orale Schleimhautgewebe[J]. *Laryngorhinootologie*, 1992, **71**(7): 347~352
- 6 S. Sporri, M. Frenz, H. J. Altermatt *et al.*. Effects of various laser types and beam transmission methods on female organ tissue in the pig: an in vitro study[J]. *Lasers Surg. Med.*, 1994, **14**(3): 269~278
- 7 H. W. Kang, H. Lee, J. M. H. Teichman *et al.*. Dependence of calculus retropulsion on pulse duration during Ho:YAG laser lithotripsy[J]. *Lasers Surg. Med.*, 2006, **38**(8): 762~772
- 8 H. Lee, R. T. Ryan, J. Kim *et al.*. Dependence of calculus retropulsion dynamics on fiber size and radiant exposure during Ho:YAG lithotripsy[J]. *J. Biomech. Engng.*, 2004, **126**(4): 506~515
- 9 H. Lee, H. W. Kang, J. M. H. Teichman *et al.*. Urinary calculus fragmentation during Ho:YAG and Er:YAG lithotripsy [J]. *Lasers Surg. Med.*, 2006, **38**(1): 39~51
- 10 H. W. Kang, A. J. Welch. Effect of liquid thickness on laser ablation efficiency[J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **101**(8): 083101