

聚焦辐照条件对脉冲CO₂激光诱导液体气穴通道效应的影响

李旭伟 陈传国 张先增 詹振林 谢树森

福建师范大学激光与光电子研究所医学光电科学与技术教育部重点实验室, 福建省光子技术重点实验室,
福建 福州 350007

摘要 利用高速摄像技术检测脉冲CO₂激光诱导液体气穴通道形成、发展和坍塌的动态过程,考察不同聚焦辐照条件对气穴效应的影响。实验获得了气穴通道脉动过程的序列图像,得到了表征气穴通道特性的参数(如最大穿透深度等)。实验结果表明,不同聚焦条件对气穴通道的动力学过程有显著影响。正离焦及焦点位置条件下,气穴通道在最大纵深时,整体形态类似于漏斗状,而负离焦条件下,则呈U形。研究结果对激光医疗、激光水下加工、能源等领域的研究具有一定的参考价值。

关键词 医用光学;激光消融;气穴通道;聚焦条件;高速摄像技术

中图分类号 R318.51 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0217001

Influence of Different Defocus Conditions on Vapor Channel Induced by Pulsed CO₂ Laser

Li Xuwei Chen Chuanguo Zhang Xianzeng Zhan Zhenlin Xie Shusen

Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology for Medicine of the Ministry of Education, Fujian Provincial Key Laboratory for Photonics Technology, Institute of Laser and Optoelectronics Technology, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China

Abstract The dynamic process of generation, propagation and collapse of vapor channel induced by pulsed CO₂ laser is monitored by a high speed camera. The influence of different defocus conditions on vapor channel is investigated. Sequence images of vapor channel process are captured, and coefficients that characterize vapor channel such as maximum depth are acquired. The results show that different defocus conditions have significant impact on kinetic process of vapor channel. Under pre-focus and focus plane conditions, the shape is similar to a funnel as the vapor channel propagates to the maximum depth, however, under the post-focus condition, the shape is similar to U. The experiment results provide reference for laser medicine, underwater laser processing and energy fields.

Key words medical optics; laser ablation; vapor channel; defocus conditions; technology of high speed photography

OCIS codes 170.1020; 140.3390; 140.3538; 040.1490

1 引言

液体介质介导生物硬组织激光消融是当前激光消融领域研究的重点和热点问题。研究表明,水等液体

收稿日期: 2014-08-18; 收到修改稿日期: 2014-10-04

基金项目: 国家自然科学基金(81301253)、福建省自然科学基金(2012J01255, 2014J01227)、福建省教育厅科技项目(JA11045, JA14085)

作者简介: 李旭伟(1988—),男,硕士研究生,主要从事医学光子学方面的研究。E-mail: xwlkui@sina.com

导师简介: 张先增(1975—),男,博士,副教授,主要从事医学光子技术与仪器方面的研究。E-mail: xzzhang@fjnu.edu.cn (通信联系人)

介质的介入不仅能够减少组织体的热损伤并清洁消融切口,还可以增强消融效率和改善消融效果^[1-4]。尽管水介导消融作用在临床上已经获得广泛应用,如激光表面清洁^[5-6]、激光截骨术^[7]、牙组织消融^[8-9]等,但水等液体介质介导增强生物组织消融效应的机理尚未得到很好的解释。Golubev^[10]研究小组提出了脉冲激光诱导液体介质产生气穴通道的模型,并对气穴通道的穿透深度和生长速率等重要参数进行了研究。Mir等^[11]提出的气穴通道理论是目前较为认可的理论之一,该理论认为水膜层吸收部分入射激光能量后将产生气穴通道,后续激光正是通过这一通道后直接作用于靶组织。当气穴通道溃灭时,产生的机械应力也会作用于样品表面,因此对消融切口具有冲刷和清洁的作用。Apitz等^[12]采用高速摄影法对激光辐照水、肝脏和皮肤的动态过程进行检测,并获得消融动态过程图,结果表明激光辐照下的消融动力学特点是消融产生的羽状细屑的飞溅过程具有明显的阶段性。Wang等^[13]对激光空泡与近自由液面的相互作用进行研究,获得了无量纲距离与空泡特性之间的关系。虽然国内外对激光诱导空化空泡效应的研究较为成熟,然而气穴通道作为激光与液体相互作用的重要物理现象之一,其实验研究还未完全深入,相关数据还相对缺乏。

本文采用脉冲CO₂激光作为辐射光源,以纯水为研究对象,利用高速摄像机全程监测激光作用于液体介质,诱导气穴通道形成、发展和坍塌的动态过程。通过图像处理与数据统计分析,获得了气穴通道的脉动特性及最大穿透深度、生长时间等特性参数,认为气穴通道的演化特征与激光聚焦辐照条件有着直接的关系。相关实验结果对激光医疗、激光水下加工、能源等领域的研究具有一定的参考价值。

2 实验装置

基于高速摄像技术的激光诱导液体介质气穴通道效应测量系统如图1所示。系统光源为脉冲CO₂激光,波长为10.64 μm,纯水对该波长激光的吸收系数为817 cm⁻¹,穿透深度为12 μm。激光谐振腔发出的基模辐射场,其横截面的振幅分布遵守高斯函数,故称高斯光束^[14]。本文采用的脉冲CO₂激光符合高斯函数分布,束腰位置光斑尺寸为260 μm,能量密度最大,随着偏离束腰位置距离的增加,能量密度逐渐减小,且关于束腰位置对称分布。保持激光光束位置不变,调整自由液面高度,使液面处的激光分别处于正离焦(56.3 J/cm²)、焦点位置(58.9 J/cm²)、负离焦(56.3 J/cm²)这三种辐照条件下。在纯水液面,当激光能量密度超过气穴通道的产生阈值9.14 J/cm²时^[15],将产生气穴通道。每种聚焦辐照条件下重复8次实验。

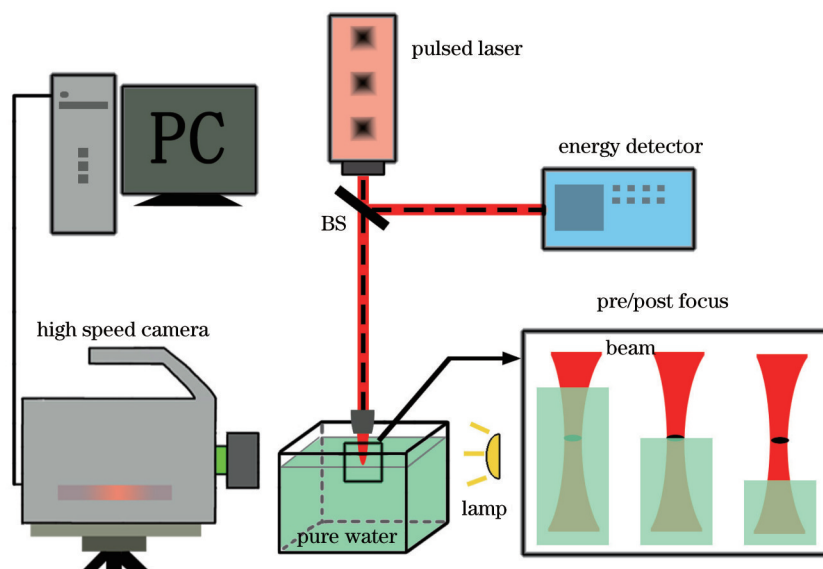


图1 激光诱导液体气穴通道效应测量系统图

Fig.1 System of laser induced vapor channel experiment

实验采用高速摄影法^[16],利用高速摄像机记录气穴通道从形成到溃灭的完整过程,使用图像处理技术处理获得的序列图像,可以得到表征气穴通道特性的参数,原理相对简单,实验易于操作^[17]。采用的高速摄像机为德国PCO公司生产的PCO.dimax相机,实验根据相机设置及拍摄范围调节拍摄帧数为58465 frame/s,图

像尺寸为 144 pixel×168 pixel,曝光时间为 1 μ s,相机捕捉到的图片的横纵坐标尺度完全相同。实验采用透射式拍摄,照明光透过玻璃容器进入高速摄像机镜头,由于照明光在气穴通道处发生折射,导致进入摄像机的光减少,使气穴通道较暗,而气穴通道以外的纯水部分则较为明亮。

3 实验结果与分析

图 2~4 所示分别为正离焦、焦点位置、负离焦三种不同聚焦辐照方式下脉冲 CO_2 激光诱导纯水气穴通道的形成、发展和坍塌序列图。图中黑色的部分为气穴通道或气泡,颜色较为明亮的背景为纯水。三种不同聚焦方式下气穴通道生长形态特征各不相同。正离焦条件下(图 2),气穴通道形成初期呈锥状,随后慢慢向四周扩张,0.44 ms 时在已形成的气穴通道的底部产生一个新的竖直向下生长的气穴通道,在气穴通道产生 1.69 ms 时达到最大纵深,其整体形态类似于漏斗状,随后气穴通道在流体性质的约束下断裂、坍塌。焦点位置条件下(图 3),气穴通道的生长形态特征与正离焦条件下类似,在 0.44 ms 时产生新的向下生长的气穴通道,并在 1.03 ms 时达到最大纵深。负离焦条件下(图 4),气穴通道的生长形态与前两者完全不同,气穴通道以类似于 U 的形状迅速生长,经过 0.287 ms 即到达最大纵深,之后气穴并非直接溃灭,而是维持该形状一段时间(约为 0.192 ms),之后在惯性以及液体共同作用下,在液体内部形成一个气团,最后上浮消失。

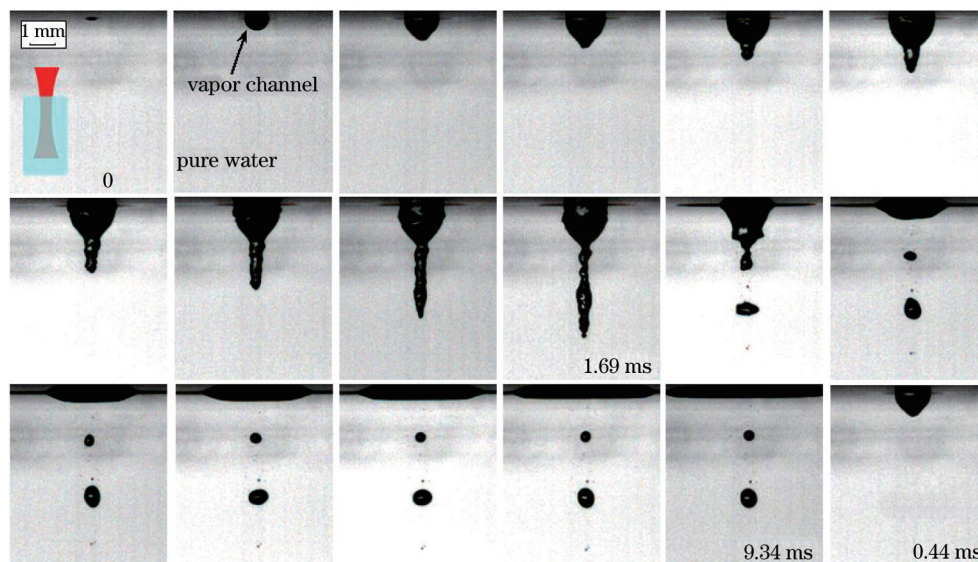


图 2 正离焦(56.3 J/cm^2)条件下气穴通道形成过程序列图。0~1.69 ms 图片间隔为 0.19 ms,1.69~9.34 ms 图片间隔为 1.09 ms
Fig.2 Sequence pictures of vapor channel formation within a period under the pre-focus condition (56.3 J/cm^2). Interval of 0~1.69 ms images is 0.19 ms, interval of 1.69~9.34 ms images is 1.09 ms

当脉冲 CO_2 激光作用于液体表面时,液体被击穿,形成等离子体,等离子体迅速吸收激光能量,使液面处液体温度迅速上升,产生爆炸式膨胀,进而演变成气穴通道^[16]。实验过程中能够看到水面振动并且听到“噗噗”的声音,同时实验发现在正离焦条件以及焦点位置条件下,在已形成的气穴通道底部将产生一个全新的竖直气穴通道。这从侧面说明激光能够穿透气穴通道直接作用于下方,与 Mir 等^[12]提出的“水膜层吸收部分入射激光能量后将产生气穴通道,后续激光正是通过这一通道作用于靶组织”相一致。同时气穴通道在生长过程中受到水蒸气焓、蒸气温度、表面张力、热传导和内表面凝结等实质性影响^[18],导致气穴通道从产生到坍塌的水动力特性极其复杂。纯水介质表层上位于高斯光束辐照部分的中间区域,会吸收激光大部分能量而产生爆炸性汽化,位于高斯光束辐照区域的周围部分则发生快速汽化^[19],因此气穴通道生长初期呈现 V 形。

利用图像处理技术对高速摄像机获得的序列图像进行分析处理,获得气穴通道的关键特性参数。图 5 为三种聚焦辐照条件下脉冲 CO_2 激光诱导液体介质气穴通道的截面积(气穴通道达到最大纵深时的纵截面积)、最大横向宽度、气穴通道产生至生长到最大纵深所需时间以及最大纵深柱状关系图。气穴通道特性参数都随聚焦条件的变化而呈现出逐渐减小的趋势。无论是正离焦还是负离焦,其在液面处的能量密度是一

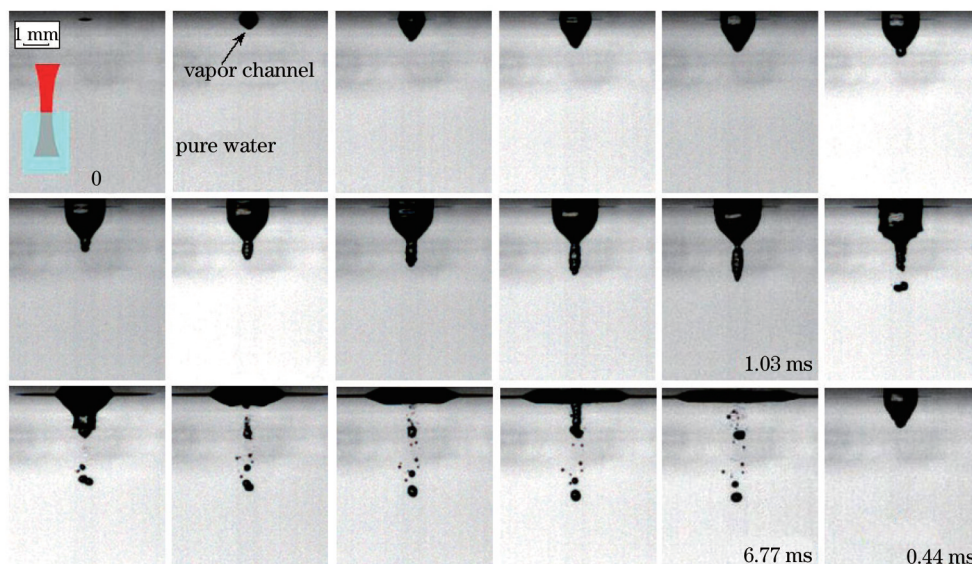


图3 焦点位置(58.9 J/cm^2)条件下气穴通道形成过程序列图。0~1.03 ms 图片间隔为0.103 ms, 1.03~6.77 ms 图片间隔为0.96 ms
Fig.3 Sequence pictures of vapor channel formation within a period under the focus plane condition (58.9 J/cm^2). Interval of 0~1.03 ms images is 0.103 ms, interval of 1.03~6.77 ms images is 0.96 ms

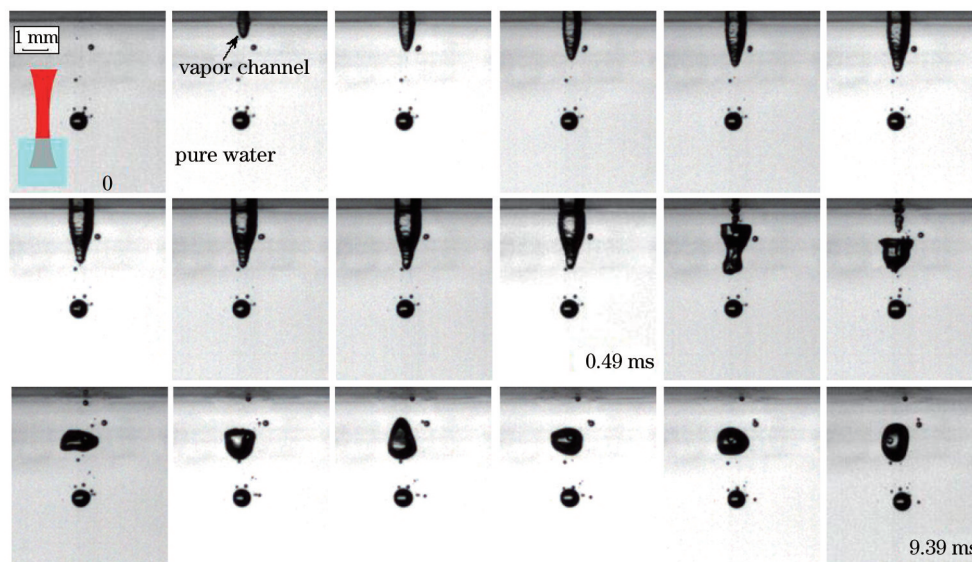


图4 负离焦(56.3 J/cm^2)条件下气穴通道形成过程序列图。0~0.49 ms 图片间隔为0.05 ms, 0.49~9.39 ms 图片间隔为1.11 ms
Fig.4 Sequence pictures of vapor channel formation within a period under the post-focus condition (56.3 J/cm^2). Interval of 0~0.49 ms images is 0.05 ms, interval of 0.49~9.39 ms images is 1.11 ms

致的,都为 56.3 J/cm^2 ,但产生的气穴通道却截然不同。这主要是由于液面下方激光光束能量密度分布不一致引起的^[18]。正离焦条件下,高斯光束焦点位于液面下方,液面下方的能量密度随深度先增加后减小;负离焦条件下,高斯光束焦点位于液面上方,液面下方能量密度始终小于液面处能量密度,并且随着深度的增加而减小;当光束聚焦于液面即焦点位置(58.9 J/cm^2)时,能量密度随着深度的增加而减小。图5(d)所示为气穴通道最大纵深随聚焦条件变化的堆积柱状图,气穴通道总的纵深为原始气穴与二次气穴纵深之和,负离焦条件下,气穴通道不会产生二次气穴通道。

图6为气穴通道纵向深度随时间变化的关系图。三种聚焦辐照条件下的气穴通道的纵向深度都是随着时间的推移而逐渐增大。激光诱导产生气穴通道初期,负离焦条件下气穴纵向生长较正离焦及焦点位置更快、更迅速,并且到达最大纵深仅仅需要 $287.3 \mu\text{s}$,正离焦气穴通道初始阶段纵向生长速度较焦点位置略小。通过实验数据的比对发现,正离焦以及焦点位置条件下,二次气穴几乎同时产生($441.3 \mu\text{s}$),并且两者

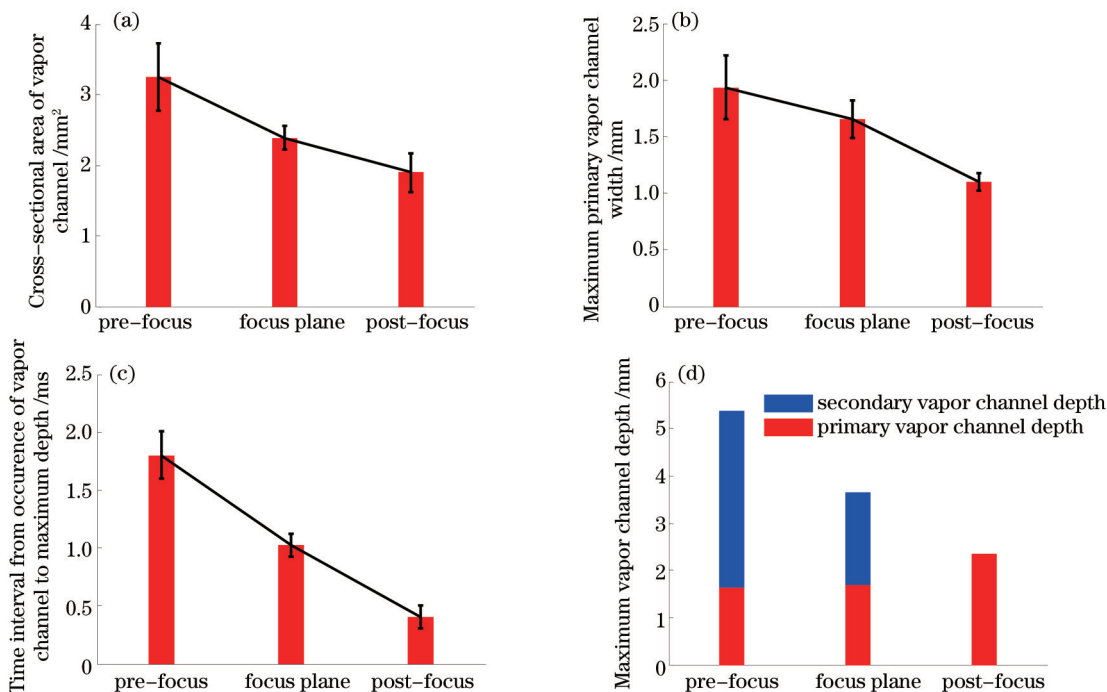


图5 不同聚焦方式下气穴通道重要参数柱状图。(a)截面积;(b)最大横向宽度;(c)气穴通道产生至生长到最大纵深所需时间;(d)最大纵深

Fig.5 Histograms of critical parameters of vapor channel under different focus conditions. (a) Cross-sectional area of vapor channel; (b) maximum primary vapor channel width; (c) time interval from occurrence of vapor channel to maximum depth; (d) maximum vapor channel depth

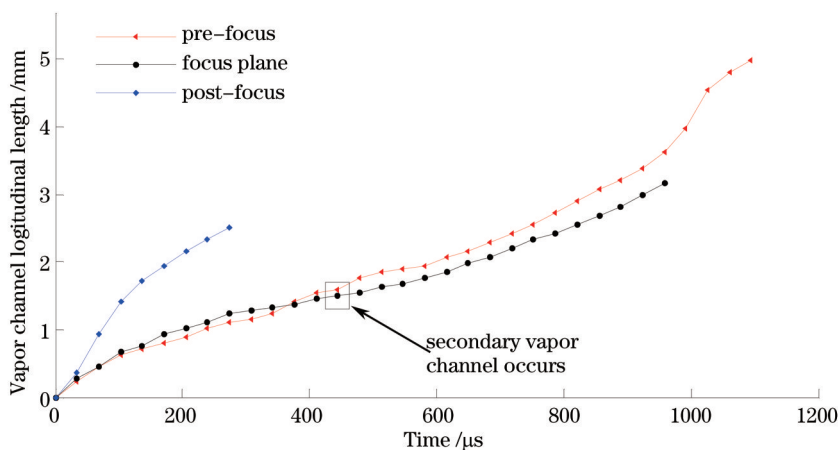


图6 不同聚焦条件下气穴通道纵向深度随时间(从产生至最大纵深)的变化关系

Fig.6 Vapor channel longitudinal length under different focus conditions as a function of time from occurrence of vapor channel to maximum vapor channel depth

的二次气穴生长速度近乎一致。气穴通道横向宽度随时间变化的关系图如图7所示,三种辐照条件下的横向宽度在0~90 μs迅速增长,随后增长速度开始减慢。通过拟合正离焦以及焦点位置条件下横向宽度的位移(68.4~712.9 μs),发现在这一时间段内两者的斜率(即速率)高度一致,都为 $k=0.0012$ 。说明这段时间内两种聚焦辐照条件下产生的气穴通道在水平方向上以一恒定的速率向外膨胀。随着时间的推移,正离焦条件下的横向宽度开始收缩,而焦点位置却维持较大的横向宽度。Frenz等^[20]采用Er⁺³:YAG激光器辐照自由液面,发现气穴通道的传播速度严重依赖于焦点相对于水面的位置和激光的能量密度。本次实验发现气穴通道的整体形态与聚焦辐照条件有直接关系,其在横纵方向的生长速度与聚焦辐照条件却没有直接关系,这

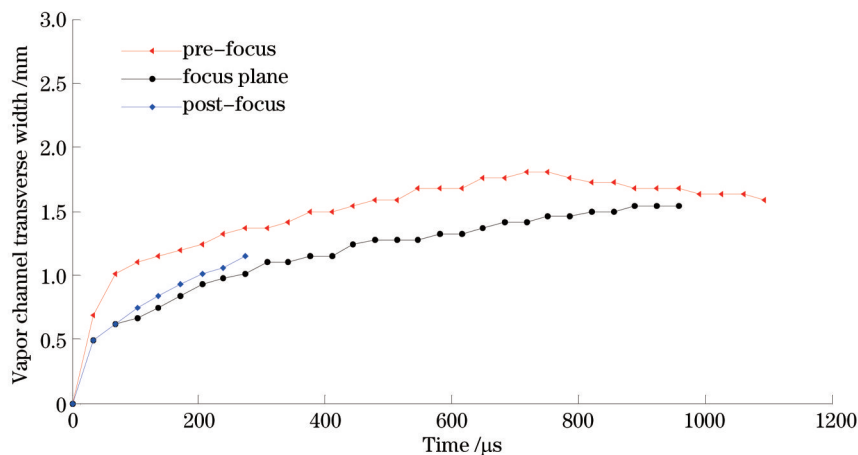


图7 不同聚焦条件下气穴通道横向宽度随时间(从产生至最大纵深)的变化关系

Fig.7 Vapor channel transverse width under different focus conditions as a function of time from occurrence of vapor channel to maximum vapor channel depth

可能与不同波长的激光在纯水中的穿透深度有关^[21]。

4 结 论

采用高速摄像技术对不同聚焦条件下脉冲 CO_2 激光诱导纯水介质气穴通道形成、发展、溃灭的动态过程进行监测。图像处理与数据分析结果表明,不同聚焦辐照条件下的气穴通道形态、生长过程具有各自不同的特点,即气穴通道的生长形态依赖于聚焦辐照条件:焦点位置及正离焦条件下的气穴通道在最大纵深时,整体形态类似于漏斗状,负离焦条件下则呈U形。同时在正离焦以及焦点位置条件下监测到二次气穴产生、发展的完整过程,说明激光能够穿过气穴通道作用于底部。实验结果对激光医疗、激光水下加工、能源等领域的研究具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- 1 M Staninec, J Xie, C Q Le, *et al.*. Influence of an optically thick water layer on the bond-strength of composite resin to dental enamel after IR laser ablation [J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2003, 33(4): 264-269.
- 2 L R Friesen, C M Cobb, J W Rapley, *et al.*. Laser irradiation of bone: II. Healing response following treatment by CO_2 and Nd: YAG laser [J]. *Journal of Periodontology*, 1999, 70(1): 75-83.
- 3 J Meister, R Franzen, K Forner, *et al.*. Influence of the water content in dental enamel and dentin on ablation with erbium YAG and erbium YSGG lasers [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2006, 11(3): 34030.
- 4 X Zhang, Z Zhang, H Liu, *et al.*. Influence of water layer thickness on hard tissue ablation with pulsed CO_2 laser [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2012, 17(3): 038003.
- 5 P T Leung, N Do, L Klees, *et al.*. Transmission studies of explosive vaporization of a transparent liquid film on an opaque solid surface induced by excimer-laser-pulsed irradiation [J]. *Journal of Applied Physics*, 1992, 72(6): 2256-2263.
- 6 M She, D Kim, C P Grigoropoulos. Liquid-assisted pulsed laser cleaning using near-infrared and ultraviolet radiation [J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, 86(11): 6519-6524.
- 7 H W Kang, H Lee, S Chen, *et al.*. Enhancement of bovine bone ablation assisted by a transparent liquid layer on a target surface [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2006, 42(7): 633-642.
- 8 D Fried, N Ashouri, T Breunig, *et al.*. Mechanism of water augmentation during IR laser ablation of dental enamel [J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2002, 31(3): 186-193.
- 9 H W Kang, J Oh, A J Welch, *et al.*. Investigations on laser hard tissue ablation under various environments [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2008, 53(12): 3381-3390.
- 10 V S Golubev, F K Mirzoev. Hydrodynamic aspects of the channel formation by a CO_2 laser beam penetrating deep into a liquid [J]. *Technical Physics Letters*, 2003, 29(3): 188-190.
- 11 M Mir, N Gutknecht, R Poprawe, *et al.*. Visualising the procedures in the influence of water on the ablation of dental hard tissue

- with erbium: yttrium–aluminium–garnet and erbium, chromium: yttrium–scandium–gallium–garnet laser pulses [J]. *Lasers in Medical Science*, 2009, 24(3): 365–374.
- 12 I Apitz, A Vogel. Material ejection in nanosecond Er:YAG laser ablation of water, liver, and skin [J]. *Applied Physics A*, 2005, 81(2): 329–338.
- 13 Liu Tao, Wang Jiang'an, Zong Siguang, *et al.*. Experimental study of laser-generated cavitation bubble motion near a free liquid surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0714003.
刘涛, 王江安, 宗思光, 等. 激光空泡在近自由液面运动特性的实验研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0714003.
- 14 Zhou Guoquan. Study on High Order Lorenz–Gauss Beam [M]. Beijing: Science Press, 2013. 57–60.
周国泉. 高阶洛伦兹–高斯光束的研究[M]. 北京: 科学出版社, 2013. 57–60.
- 15 W Guo, X Zhang, Z Zhan, *et al.*. The threshold of vapor channel formation in water induced by pulsed CO₂ laser [C]. SPIE, 2012, 8553: 85531Y.
- 16 Zong Siguang, Wang Jiang'an, Wang Huihua. Image measure of characters of cavitation bubble by optical breakdown [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(8): 2197–2202.
宗思光, 王江安, 王辉华. 光击穿液体空泡特性的高速图像测量[J]. *光学学报*, 2009, 29(8): 2197–2202.
- 17 Ni Xiaowu, Chen Xiao, Lu Jian. Study on the mechanism of interaction between laser and liquid material [J]. *Laser Technology*, 2002, 26(4): 258–261.
倪晓武, 陈笑, 陆健. 激光与液态物质相互作用机理的研究进展[J]. *激光技术*, 2002, 26(4): 258–261.
- 18 M Forrer, M Ith, M Frenz, *et al.*. Mechanism of channel propagation in water by pulsed erbium laser radiation [C]. SPIE, 1994, 2077: 72–77.
- 19 S L Jacques, G Gofstein. Laser–flash photographic studies of Er:YAG laser ablation of water [C]. SPIE, 1991, 1427: 63–67.
- 20 M Frenz, A D Zweig, V Romano, *et al.*. Dynamics in laser cutting of soft media [C]. SPIE, 1990, 1202: 22–33.
- 21 M Forrer, M Frenz, V Romano, *et al.*. Channel propagation in water and gelatin by a free–running erbium laser [J]. *Journal of Applied Physics*, 1993, 74(1): 720–727.

栏目编辑: 吴秀娟