

脉宽可调钬激光诱导高速射流实验研究

吕涛^{1,2,3} 张伟^{1*} 陈昉¹

¹中国地质大学(武汉)数学与物理学院, 湖北 武汉 430074

²中国科学院苏州生物医学工程技术研究所, 江苏省医用光学重点实验室, 江苏 苏州 215163

³中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北 武汉 430074

摘要 光纤传输红外脉冲激光在密闭容器内爆炸式汽化液体形成汽化泡促使液体体积急剧膨胀,在喷嘴处形成高速液体射流。利用聚偏氟乙烯(PVDF)针式水听器探测不同激光参数和光纤位置条件下钬激光脉冲诱导高速液体射流的射流压力和汽化效应诱导声波信号,其电信号在示波器上显示并记录,分析射流压力和声波强度与激光脉宽和激光强度的变化关系。实验结果表明激光平均能量为426.3 mJ时射流压力与脉宽(494~967 μs)呈正相关函数变化关系,声波强度在光纤末端与喷嘴间距 $d=2\text{ cm}$ 和 $d=4\text{ cm}$ 时与脉宽呈负相关函数变化关系, $d=6\text{ cm}$ 时声波强度随脉宽的增大呈先升后降的变化趋势,在736 μs 脉宽时声波强度达到最大值1.32 MPa;脉宽为480 μs 时射流压力和声波强度随激光能量(266.3~420.8 mJ)增大而增大;当激光参数恒定时声波信号和射流信号均随 d 增大而增大。

关键词 医用光学; 脉冲钬激光; 汽化泡; 高速射流

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0704002

Experimental Study of Tunable Pulse Duration Ho:YAG Laser-Induced Liquid Jet

Lü Tao^{1,2,3} Zhang Wei¹ Chen Fang¹

¹School of Mathematics and Physics, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China

²Jiangsu Key Laboratory of Medical Optics, Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215163, China

³State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resource, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract High speed liquid jet from the nozzle of one closed vessel can be formed, which is urged by vaporization effect induced by fiber-transmitting infrared pulse lasers. The signals of water-jet pressure and shock wave pressure under various laser parameters and stand-off distances (d : distance between the end of optical fiber and the nozzle exit) are detected by two polyvinylidene fluoride (PVDF) needle hydrophones and are recorded by one oscilloscope. The relationship between water-jet pressure, shock wave pressure and pulse duration, laser energy is analyzed. The experimental result indicates that there is a positive correlation between water-jet pressure and pulse duration (494~967 μs) when the laser energy is 426.3 mJ. Contrarily, the relationship between shock wave pressure and pulse duration is negative when d is 2 cm or 4 cm. However, for $d=6\text{ cm}$ the shock wave pressure increases firstly and decreases afterwards, and reaches a maximum value of 1.32 MPa when the pulse duration is 736 μs . Both water jet pressure and shock wave pressure increase in proportion to pulse energy (266.3~420.8 mJ) when the pulse duration is 480 μs . When the laser parameters are invariable, jet pressure and shock wave pressure all increase with increase of d .

Key words medical optics; pulsed holmium laser; vaporization bubble; high speed jet

OCIS codes 170.1610; 120.3890; 280.5475; 280.3375; 140.3538

收稿日期: 2014-12-23; 收到修改稿日期: 2015-04-01

基金项目: 武汉市青年科技晨光计划(201271031430)、中国博士后科学基金面上项目(2014M2104)、中国科学院江苏省医用光学重点实验室开放基金(JKLM0201405)、湖北省自然科学基金(2014CFB335)

作者简介: 吕涛(1977—),男,博士,副教授,主要从事激光医学方面的研究。E-mail: lvtaohn@sina.com

*通信联系人。E-mail: 245664675@qq.com

1 引 言

水对波长为 2.12 μm 的钬激光吸收系数约为 30 cm^{-1} ^[1-2], 临床应用中当钬激光作用于平均含水量为 70% 以上的人体软组织时^[3], 能量会被组织水分吸收, 并且钬激光可以通过低 OH^{-1} 的石英光纤远距离低损耗传输, 提高了组织消融时的可操作性及准确性^[4-5], 所以钬激光广泛应用于软组织切割、体内碎石等临床医学领域^[6-9]。然而, 钬激光常常工作于液体环境条件(血液、水、尿或液体混合物)下^[10-12], 在液态介质中钬激光能量被液体快速吸收, 在光纤端面形成微米至毫米级尺寸的汽化泡^[13-14]。除了激光的热作用外, 汽化泡溃灭时辐射的冲击波会对周围正常的生物组织造成不同程度损伤^[15-16], 例如心血管治疗中特别是激光血管成形术过程中, 膨胀的汽化泡能撑大血管壁导致损伤的血管术后再狭窄^[17]; 而在眼外科手术中, 汽化泡闭合辐射冲击波是治疗中损伤副效应的直接来源^[18-19]。

针对以上钬激光与生物组织直接作用时的弊端, 并基于光能-热能-机械能的能量转换模式, 日本学者 Hirano 等^[20]采用脉宽为 350 μs 、单脉冲能量为 230 mJ 的钬激光水中汽化诱导高速射流溶解血栓, 结果表明激光诱导射流冲击力和声波信号受光纤位置的影响, 产生的药物射流可以消融血栓, 并将药物传送到血栓内部增大药物与血栓的接触面积从而提高溶栓效率。Tominaga 等^[21]对喷嘴内径为 0.1 mm 的射流特性做了进一步研究, 得出射流体积和射流压力均与脉冲激光能量(100~500 mJ/pulse)呈线性正比关系; 激光能量为 433 mJ 时射流速度随光纤位置(光纤末端距喷嘴 $d=10\sim 30 \text{ mm}$)的增大呈先升后降的走势, 并在 $d=18 \text{ mm}$ 处达到最大值 20 m/s。Ohki 等^[22]研究了利用钬激光诱导高速射流切割脑组织, 分别采用内径为 200 μm 和 1000 μm 的喷嘴, 结果表明直径超过 100 μm 的脑血管均得到保留, 无明显的热损伤效应且手术出血少, 此方法有望成为一种新型的神经外科手术刀得到广泛运用。Yoshikazu 等^[23]用激光诱导高速射流对 21 名伴有颅内肿瘤并压迫视神经导致视觉障碍的患者进行了肿瘤切除手术, 手术期间有效地保护了肿瘤周围的血管和神经, 证明该方法安全、高效。张巧等^[24-25]在液体射流条件下研究了双脉冲激光诱导 Ca 等离子体发射光谱。本文介绍不同激光参数和光纤位置对射流压力和声波强度的影响, 得出射流压力和声波强度随激光能量、脉宽和光纤位置的变化关系, 为钬激光脉冲诱导高速液体射流手术刀在临床医学中的应用提供理论指导及实践支持。

2 实 验

2.1 激光参数测量

实验前通过光功率能量计(以色列 Ophir 公司, 表头 NOVA II, 探测器 PE50BF-C)和光电探测器(PV-3, 波兰 Vigo 公司, 响应时间 $\tau < 15 \text{ ns}$) 分别对不同电源参数下的激光能量和脉宽进行测量, 测量能量时光纤末端距探测器端面 5 mm, 测量时间为 10 s, 图 1 为抽运电压为 1000 V, 电源脉宽为 1.4 ms, 工作频率为 5 Hz 时探测到的激光能量随时间的变化关系图, 可见初始脉冲能量较大, 第 10 s 时探测到的瞬时能量为 426.0 mJ, 10 s 内测得平均能量为 437.8 mJ, 标准偏差为 9.343 mJ, 能量波动为 2.13%, 可视为恒定输出。测量脉宽时为了避免激光直接作用光电探测器敏感端面致使探测器损伤, 所探测光信号来自激光打在铁板上的部分反射光。图 2 为示波器显示的抽运电压 1000 V、电源脉宽 1.0 ms、频率 5 Hz 条件下输出半峰全宽为 616 μs 的激光脉冲波形。

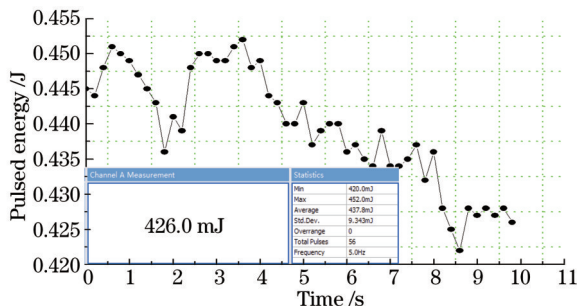


图 1 激光脉冲能量与时间的关系(10 s 内)

Fig.1 Relationship between pulse energy and time (within 10 s)

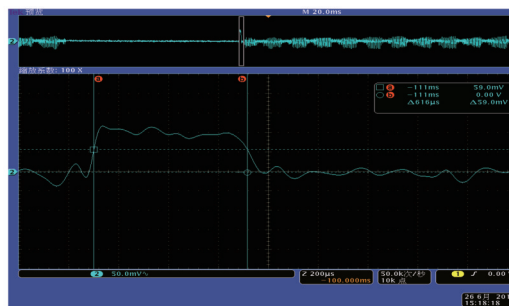


图 2 1 ms 抽运脉宽条件下钬激光脉宽波形(616 μs)

Fig.2 Oscilloscope traces of holmium:YAG laser pulse profile (616 μs) under pump duration of 1 ms

2.2 实验原理及系统

2.2.1 原 理

钬激光脉冲经光纤传输至充满水的射流器内,爆炸式汽化光纤端面液态水形成汽化泡,汽化泡迅速向外膨胀推动射流器内的水经喷嘴喷出而形成高速射流,汽化泡在溃灭时辐射出冲击波,作用期间汽化泡在彻底闭合前在内外压强差作用下通常会反复振荡数次,每次闭合时会辐射一个冲击波信号,谐振过程中不断对周围环境水做功,自身能量不断衰减,所以汽化泡第一次谐振周期内膨胀速度达到最快,体积达到最大,闭合时辐射的冲击波信号最强,因此着重研究汽化效应进程中的高速射流和首个声波信号随实验条件的变化规律。

2.2.2 实验流程和方法

实验流程如图3所示,采用氙灯抽运的自由运转固体钬激光器,激光波长为 $2.12\ \mu\text{m}$,激光的能量、脉宽和频率均可通过激光电源(BJHZ-SP06)进行调节,抽运电压为 $0\sim 1000\ \text{V}$ 、电源脉宽为 $0.2\sim 2\ \text{ms}$ 、频率为 $1\sim 50\ \text{Hz}$ 。利用 CaF_2 凸透镜(北京玻璃研究院,直径 $15\ \text{mm}$,焦距 $15\ \text{mm}$)将钬激光脉冲聚焦并耦合进 $800\ \mu\text{m}$ 芯径的低 OH^- 石英光纤(南京春晖科技, $NA=0.22$),光纤末端插入高速射流发生器装置内,射流器主要由光纤固定端、进液口、主体毛细管和喷嘴构成,实验所用射流器的主体内径和喷嘴直径均为 $1.2\ \text{mm}$ (略大于光纤外径 $1.0\ \text{mm}$),钬激光脉冲经光纤传输至射流器内,基于其水下爆炸式汽化效应,形成汽化泡并向外快速膨胀,推动泡后端水由喷嘴高速射出。射流冲击力和声波信号都采用聚偏氟乙烯(PVDF)压电材料的针式水听器进行探测,其中PVDF1(PT-0907112,中国科学院声学研究所,敏感端面直径为 $0.8\ \text{mm}$,分辨率为 $10\ \text{nV/Pa}$,响应时间为数十纳秒)用于探测射流冲击力,与射流器输出端同轴放置,其敏感端面距射流器输出端 $2\ \text{mm}$;PVDF2(No.1738, Precision Aconstics Ltd., 英国,敏感端面直径为 $0.2\ \text{mm}$)用于探测声波信号,垂直于射流器输出端放置,其敏感端面距射流器输出端亦为 $2\ \text{mm}$ 。针式水听器探测到的信号分别经CH1、CH2通道输入示波器(DPO4104, Tektronix Ltd., 美国, $1\ \text{GHz}$, $5\ \text{GS/s}$)进行显示。实验时首先用注射器通过进水口给射流器内注满水,然后开启激光电源和示波器并设置参数,最后启动钬激光器工作并开始数据采集,实验期间还要经进液口不断给射流器补充因射流而损失的水分。实验在两种不同条件下进行:1) 光纤位置固定或不固定时相同脉宽不同激光能量;2) 光纤位置固定或不固定时相同能量不同激光脉宽。研究采用测量多组数据取统计平均值的方法,旨在减少环境中不稳定因素对实验结果的影响。

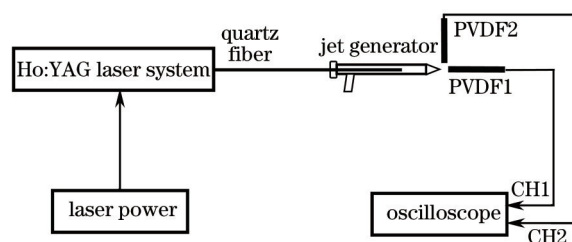


图3 钬激光诱导射流性能测试实验装置

Fig.3 Experimental setup for measuring the characteristics of liquid jet induced by holmium: YAG laser

采用高速相机(FASTCAM SA-Z, 日本)记录射流形貌,照明灯(RED120 RO190, 上海金桥精亿高科技有限公司)发出连续光垂直照射在喷嘴处的射流上,透射光进入高速相机,相机可拍摄到射流动态变化形貌图。

3 实验结果及分析

3.1 激光诱导射流动态形貌

当相机帧频设置为 $100000\ \text{frame/s}$,曝光时间为 $1/10000\ \text{s}$,分辨率为 $320\ \text{pixel}\times 128\ \text{pixel}$ 时拍摄到的钬激光诱导射流动态形貌如图4所示。射流器喷嘴直径为 $1.2\ \text{mm}$,激光开始作用前发生器内部充满液态水,由于水的粘滞性而在喷嘴下端有液滴水存在,中心部位体积大,有部分光能够穿透液滴进入相机而形成白色的部分,液滴边缘部分光由于折射而不能进入相机,因此呈现黑色部分。图4(a)中标注有不同激光参数组合时射流在 $160\ \mu\text{s}$ 时的形貌,可见 $612\ \mu\text{s}$ 、 $533.6\ \text{mJ}$ 激光诱导射流速度最快(约 $25\ \text{m/s}$), $494\ \mu\text{s}$ 、 $452.3\ \text{mJ}$ 参数组合及 $967\ \mu\text{s}$ 、 $577.9\ \text{mJ}$ 参数组合激光诱导射流速度相当,而 $736\ \mu\text{s}$ 、 $586.1\ \text{mJ}$ 参数组合激光诱导射流速度最慢。

图4(b)为400 μs时的射流动态形貌,射流速度仍然呈现图4(a)变化规律,但967 μs、577.9 mJ参数组合激光诱导射流速度稍快于494 μs、452.3 mJ参数组合激光诱导射流速度。图4(c)为射流到达相机所能拍摄照片最右端边缘时的射流形貌,到达时间分别为600、512、640、592 μs,速度变化规律类似于图4(b)速度变化规律。图4(b)、(c)显示射流顶端呈现蘑菇状不规则形貌,这与射流喷射出喷嘴时的初始状态有关。图4(d)为射流持续从左向右传输进程中的瞬态照片,均呈现规则的柱状。

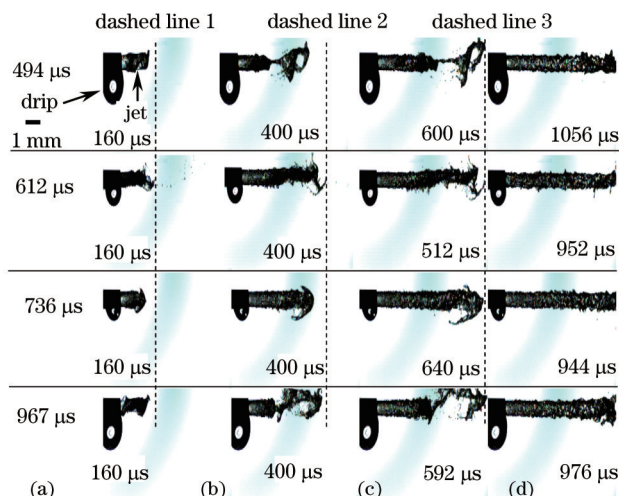


图4 不同钬激光参数组合条件下高速相机拍摄到的射流动态形貌图(间距 $d=4$ cm)

Fig.4 Dynamic profiles of liquid jet induced by holmium:YAG lasers with different parameter combinations (stand off distance $d=4$ cm)

3.2 射流压力及冲击波信号

图5为激光能量437.8 mJ、脉宽918 μs、光纤末端距射流器喷嘴间距 $d=4$ cm条件下示波器采集的单个射流压力信号[图5(a)]、单个冲击波信号[图5(b)]以及经傅里叶变换后的冲击波声学频谱[图5(c)],可看出此射流压力信号冲击强度为0.162 MPa,压力脉冲信号脉宽为108 μs;冲击波信号强度为1.09 MPa,冲击波信号脉宽为106 μs;冲击波信号频谱主要有三处峰值,分别为228、390和1010 Hz。

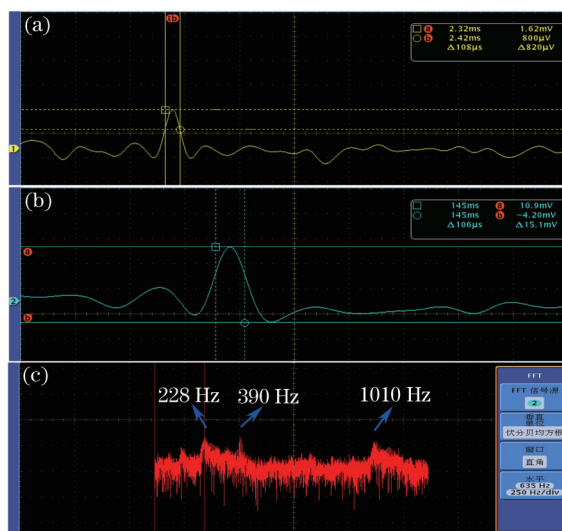


图5 钬激光能量437.8 mJ、脉宽918 μs条件下示波器采集的信号(间距 $d=4$ cm)。(a) 射流压力; (b) 冲击波压力; (c) 冲击波信号频率

Fig.5 Oscilloscope traces of signal under 437.8 mJ energy and 918 μs pulse duration. (a) Pressure of liquid jet; (b) pressure of shock wave; (c) frequency of shock wave

3.3 光纤位置固定/不固定、相同脉宽不同激光能量条件

本节研究相同激光脉宽条件下光纤端面与喷嘴间距与激光能量对射流性能特征的影响。图6为工作频率5 Hz、激光脉宽480 μs条件下, d 分别取2、4、6 cm时的射流压力[图6(a)]、声波强度[图6(b)]和声波频率[图6

(c)随激光能量(266.3~420.8 mJ)变化的关系图。理论上相同激光脉宽条件下射流压力和声波强度都随激光能量的增大而增大,由图6可看出,图6(a)中 $d=2$ cm时激光能量266.3、350、420.8 mJ所对应的射流压力分别为0.11、0.122、0.136 MPa,图6(b)中 d 为2 cm和4 cm时激光能量266.3、350、420.8 mJ对应的声波强度分别为0.6、0.78、0.86 MPa和0.64、0.82、1.0 MPa,射流压力和声波强度都随激光能量的增大而增大,与Tominaga等^[21]的实验结果类似,符合理论情况;而图6(a)中 $d=4$ cm、激光能量为266.3 mJ时对应的射流压力0.176 MPa大于激光能量为350 mJ时的0.156 MPa,并且 $d=6$ cm、激光能量为350 mJ所对应的0.22 MPa也大于激光能量为420.8 mJ时的0.18 MPa,不符合理论情况,导致个别点射流压力比理论值偏大的原因可能是激光输出不稳定(脉宽偏小)或给射流器注水时推力过大;图6(b)中 $d=6$ cm、激光能量为420.8 mJ所对应的声波强度0.92 MPa小于激光能量为350 mJ的声波强度0.96 MPa,也不符合理论情况,导致该点声波强度偏小的原因可能是激光输出不稳定(脉宽偏大)或给射流器注水时推力过小使得光纤末端水含量减少,不足以满足汽化需要,使得光能损失严重。图6(c)中任意参数下的第二个声学信号频率为定值390 Hz,波动性较小,可断定该频率不随激光能量和 d 值的变化而变化, d 相同的条件下第一个声学信号频率和第三个声学信号频率随激光能量的变化趋势一致,均为先降后升,而激光参数相同时第一个声学信号频率和第三个声学信号频率均与 d 呈正相关变化关系。

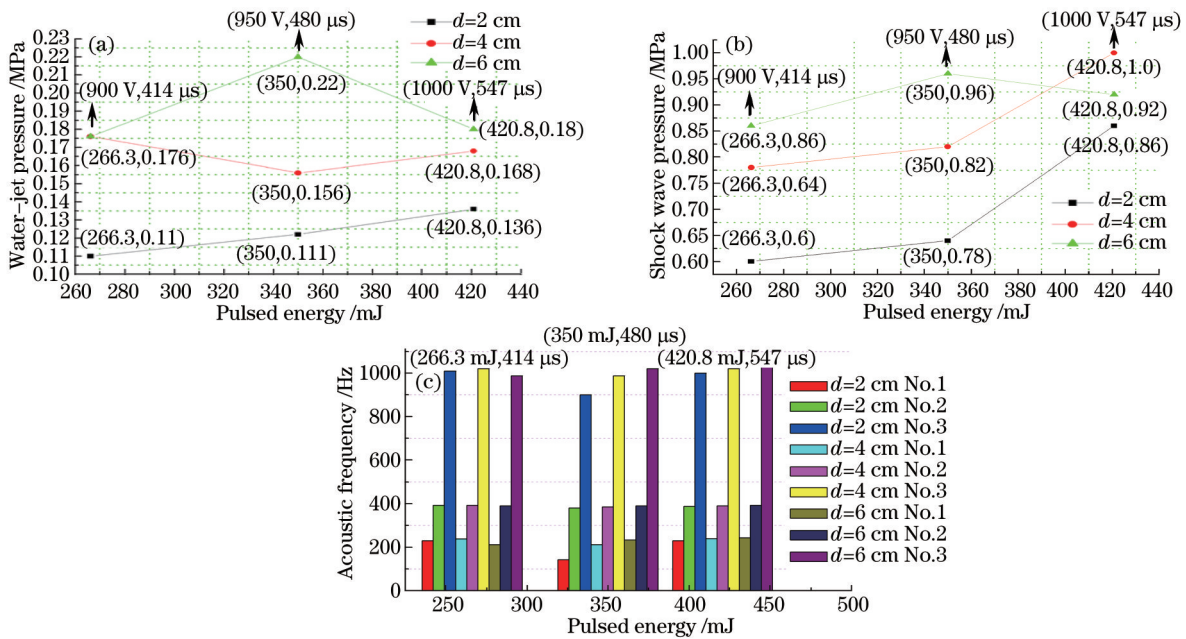


图6 480 μs脉宽钬激光不同能量条件下诱导水射流特性随激光能量的变化关系(d 为光纤端面与喷嘴间距)。

(a) 射流压力; (b) 振荡波信号; (c) 声波频率;

Fig.6 Characteristics of liquid jet induced by 480 μs holmium: YAG lasers with different energy (d : stand off distance).

(a) Liquid jet pressure; (b) shock wave signal; (c) acoustic frequency

3.4 光纤位置固定/不固定、相同能量不同激光脉宽条件

该节研究相同激光能量条件下光纤端面与喷嘴间距与激光脉冲宽度对射流性能特征的影响。对于研究激光脉宽对射流压力、声波强度和声波频率的影响,需要激光能量恒定,当取电源抽运电压为1000 V、电源脉宽为0.8~1.6 ms(实际激光脉宽494~967 μs)、工作频率为5 Hz时,输出的激光能量波动范围小于5%,可认为该激光脉宽范围内能量恒定为426.3 mJ,得到 $d=2, 4, 6$ cm时的射流压力、声波强度和声波频率随激光脉宽的变化关系分别为图7(a)~(c)。如图7(a)所示, $d=6$ cm时射流压力随激光脉宽的增大而增大,说明能量一定时,激光与汽化泡作用时间(494~967 μs范围内)越长,汽化泡吸收的激光能量就越多,膨胀越迅速,射流压力就越大;图中 $d=2$ cm、 $d=4$ cm时射流压力曲线整体趋势是随激光脉宽的增大而增大,但其中 $d=2$ cm,脉宽547 μs处和 $d=4$ cm,脉宽736 μs和967 μs处射流压力偏离轨迹、小于理想值,可能原因为激光输出不稳定(能量偏小)或给射流器注水时推力过小使得光纤末端水含量减少,不足以满足汽化所需,导致光能转化率降低。图7(b)中 $d=2$ cm时声波强度随激光脉宽的增大而减小,因为声波强度与光源功率呈正相关,激光能量

一定时,脉宽越大光功率越小,所以声波强度也随之减小; $d=4$ cm时脉宽在547~967 μs 范围也符合预期,但494 μs 处的声波强度0.76 MPa远小于547 μs 处的声波强度1 MPa,甚至小于同脉宽下 $d=2$ cm时的声波强度0.88 MPa,导致该点处声波强度过低的原因可能是激光波动(能量过小)或给射流器注水速度过慢使得汽化所需水不足,光能损失严重,转化效率降低; $d=6$ cm时声波强度随激光脉宽的增大呈先上升后下降的变化趋势,在脉宽736 μs 处达到最大声波强度1.32 MPa,随后迅速下降,而547 μs 处的声波强度偏离正常轨迹、远小于理想值,可能是此时激光能量偏小或汽化所需水不足引起。与图6(c)类似,图7(c)中任意参数下的第二个声学信号频率波动范围小于2%,也可近似认为是定值390 Hz,说明该频率不随激光脉宽和 d 的变化而变化; d 相同时第一个声学信号频率和第三个声学信号频率随激光脉宽的变化趋势一致,均为先降后升,在脉宽736 μs 处达到最小值;而激光参数相同时第一个声学信号频率和第三个声学信号频率均与 d 呈正相关。

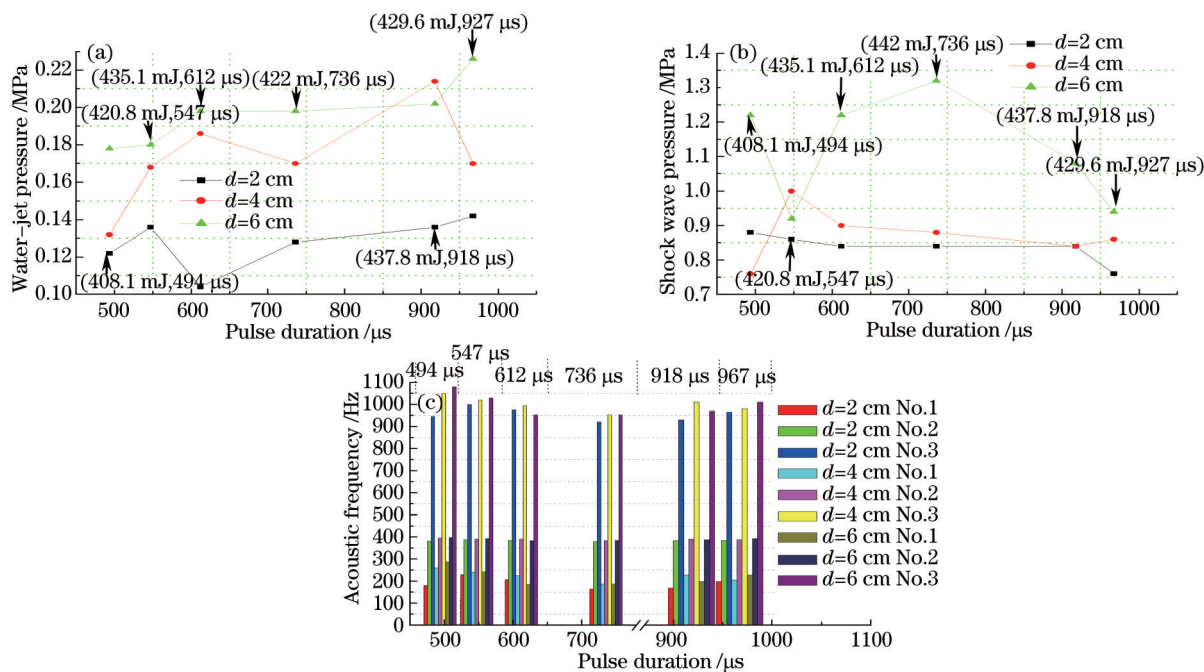


图7 钬激光诱导水射流特性随激光脉冲宽度的变化关系(d 为光纤端面与喷嘴间距)。(a)水射流压力;(b)冲击波信号;(c)冲击信号频率

Fig.7 Characteristics of liquid jet induced by holmium:YAG lasers with different pulse duration (d : stand off distance).

(a) Liquid jet pressure; (b) shock wave signal; (c) acoustic frequency

由图6、7可以看出,激光参数一定时,射流压力和声波强度近乎与 d 成正相关,该结果也符合理论预期,说明 $d(2\sim 6$ cm)越大,用于汽化所需的水越充足,激光能量越有效地被水吸收,转化效率就越大,所以射流压力和声波强度越大;并且相同条件下声波强度(0.6~1.35 MPa)大于射流压力(0.1~0.3 MPa),两者无必然联系,但都受射流器喷嘴口径影响,临床应用中选择合适的喷嘴口径、激光参数和光纤位置既能减小声波辐射对周围正常组织的损伤,又能增大射流压力,提高软组织切割效率,射流装置还可用于药物的输送,且有望用于血栓溶解术。

4 结 论

介绍不同激光参数和光纤位置条件下,采用针式水听器探测了钬激光诱导高速射流时射流冲击力和冲击波信号,并通过示波器对信号进行记录和分析。结果表明激光脉宽一定(480 μs)时射流压力和声波强度随能量(266.3~420.8 mJ)增大而增大,射流速度最大约为25 m/s;能量一定(426.3 mJ)时射流压力随脉宽(494~967 μs)增大而增大,声波强度则随脉宽增大而减小,其中 $d=6$ cm时声波强度随脉宽的增大呈先升后降的走势,在736 μs 处达到最大值1.32 MPa;从图6、7中可看出激光参数一定时声波信号和射流信号均随 d 增加而增大,并且相同条件下声波强度大于射流压力。

- 1 Lü Tao, Zhang Wei, Chen Fang. Experimental research of acoustic transients induced by holmium: YAG lasers with tunable pulse duration underwater[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0404003.
吕涛, 张伟, 陈昉. 脉宽可调钬激光诱导水下声波信号特性实验研究[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0404003.
- 2 Wang Li, Yang Jingwei, Cai Xuwu, *et al.*. 2.09 μm nanosecond holmium laser pumped ZnGeP₂ optical parametric oscillator[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0102008.
王礼, 杨经纬, 蔡旭武, 等. 2.09 μm 纳秒钬激光抽运的磷锗锌光参量振荡器[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0102008.
- 3 Kang H W, Lee H, Teichman J M, *et al.*. Dependence of calculus retropulsion on pulse duration during Ho: YAG laser lithotripsy [J]. Lasers in Surgery and Medicine, 2006, 38(8): 762-772.
- 4 Zhang X, Xie S, Ye Q, *et al.*. Wavelength dependence of soft tissue ablation by using pulsed lasers[J]. Chinese Optics Letters, 2007, 5(4): 235-237.
- 5 Oliver F, Hans S P, Flurin K, *et al.*. Side-firing fiber device for underwater tissue ablation with Ho:YAG and Er:YAG laser radiation[J]. Journal of Biomedical Optics, 1998, 3(1): 112-122.
- 6 Lü T, Xiao Q, Li Z J. Influence of water environment on holmium laser ablation performance for hard tissues[J]. Applied Optics, 2012, 51(13): 2505-2514.
- 7 Lü T, Xiao Q, Xiao D Q, *et al.*. Cavitation effect of holmium laser pulse applied to ablation of hard tissue underwater[J]. Journal of Biomedical Optics, 2010, 15(14): 048002.
- 8 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.
- 9 Lü Tao, Xiao Qing, Li Zhengjia. Cavitation effect of pulsed holmium laser and dynamic characteristics of hard tissue ablation underwater[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(12): 3558-3562.
吕涛, 肖青, 李正佳. 脉冲钬激光水下空化效应及消融生物硬组织动态特性[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3558-3562.
- 10 Dillingham M F, Price J M, Fanton G S. Holmium laser surgery[J]. Orthopedics, 1993, 16(5): 563-569.
- 11 Ith M, Prastito H, Staeubi H U, *et al.*. Side-effects of laser therapy on cartilage[J]. Sports Exer Injury, 1996, 2(4): 207-209.
- 12 Steven A S, Frederic M D, Bahaeddin J, *et al.*. Mechanisms of biliary stone fragmentation using the Ho: YAG laser[J]. IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering, 1994, 41(3): 276-283.
- 13 Lü T, Xiao Q, Li Z J. Evaluation of ablation differences in air and water for hard tissues using full-field optical coherence microscopy [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(8): 833-837.
- 14 Jansen E D, Asshauer T, Frenz M, *et al.*. Effect of pulse duration on bubble formation and laser-induced pressure waves during holmium laser ablation[J]. Lasers in Surgery and Medicine, 1996, 18(3): 278-293.
- 15 Vogel A, Lauterborn W, Timm R. Optical and acoustic investigations of the dynamics of laser-produced cavitation bubbles near a solid boundary[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1989, 206: 299-338.
- 16 Philipp A, Lauterborn W. Cavitation erosion by single laser-produced bubbles[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1998, 361: 75-116.
- 17 Vanleeuwen T G, Vanerven L, Meertrns J H, *et al.*. Origin of arterial-wall dissections induced by pulsed excimer and midinfrared laser ablation in the pig[J]. Journal of the American College of Cardiology, 1992, 19(7): 1610-1618.
- 18 Palanker D, Turovets I, Lewis A. Electrical alternative to pulsed fiber-delivered lasers in microsurgery[J]. Journal of Applied Physics, 1997, 81(11): 7673-7680.
- 19 Vogel A, Schweiger P. Intraocular Nd: YAG laser surgery: Laser-tissue interaction, damage range, and reduction of collateral effects[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1990, 26(12): 2240-2260.
- 20 Hirano T, Komatsu M, Uenohara H, *et al.*. A novel method of drug delivery for fibrinolysis with Ho: YAG laser-induced liquid jet[J]. Laser in Medical Science, 2002, 17(3): 165-172.
- 21 Tominaga T, Nakagawa A, Hirano T, *et al.*. Application of underwater shock wave and laser-induced liquid jet to neurosurgery[J]. Shock Waves, 2006, 15(1): 55-67.
- 22 Ohki T, Nakagawa A, Hirano T, *et al.*. Experimental application of pulsed Ho: YAG laser-induced liquid jet as a novel rigid neuroendoscopic dissection device[J]. Lasers in Surgery and Medicine, 2004, 34(3): 227-234.
- 23 Yoshikazu O, Atsuhiko N, Toshikatsu W, *et al.*. Tissue dissection before direct manipulation to the pathology with pulsed laser-induced liquid jet system in skull base surgery—preservation of fine vessels and maintained optic nerve function[J]. Acta

- Neurochirurgica, 2013, 155(10): 1879–1886.
- 24 Zhang Qiao, Hu Zhenhua, Ding Lei, *et al.*. Study on the liquid jet dual pulse laser-induced Ca plasma emission spectroscopy[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0215002.
张 巧, 胡振华, 丁 蕾, 等. 液体射流双脉冲激光诱导 Ca 等离子体发射光谱研究[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0215002.
- 25 Hu Zhenhua, Zhang Qiao, Ding Lei, *et al.*. Temperature and electron number density of liquid jet double-pulse laser induced breakdown Ca plasma[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0430004.
胡振华, 张 巧, 丁 蕾, 等. 液体射流双脉冲激光诱导击穿 Ca 等离子体温度和电子数密度研究[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0430004.

栏目编辑: 吴秀娟