

基于声光偏转效应的液体临界剧烈空化声压的检测

吕朋 周圆 宋珂 王华 沈勇

¹重庆医科大学生物医学工程学院, 省部共建超声医学工程国家重点实验室,
超声医学工程重庆市市级重点实验室, 重庆 400016
²超声医疗国家工程研究中心, 重庆 401121

摘要 为检测液体中发生剧烈空化时的临界声压的大小,提出了一种基于声光偏转效应对临界剧烈空化声压进行检测的方法。根据远场光斑分布的时间变化规律确定剧烈空化的发生,通过光线最大偏转距离与焦点峰值声压的关系,可非介入地检测临界剧烈空化声压值,重复性高。通过分析液体中气泡分布及变化规律,以及空化阈值声压随外界环境压强的变化规律对测量结果进行标定,证实了该方法检测临界剧烈空化声压的可行性。

关键词 几何光学;临界剧烈空化声压;声光偏转效应;聚焦超声

中图分类号 O435.1;O426.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0408001

Measurement of the Critical Intense Cavitation Pressure Based on the Acousto-Optical Refraction Effect in Liquid

Lü Peng Zhou Yuan Song Ke Wang Hua Shen Yong

¹State Key Laboratory of Ultrasound Engineering in Medicine Co-founded by Chongqing and the Ministry of Science and Technology, Chongqing Key Laboratory of Ultrasound in Medicine and Engineering, College of Biomedical Engineering, Chongqing Medical University, Chongqing 400016, China
²National Engineering Research Center of Ultrasound Medicine, Chongqing 401121, China

Abstract To measure the critical pressure when intense cavitation occurred in liquid, a method to detect the critical intense cavitation pressure which based on the acousto-optical refraction effect is proposed. According to the distribution of the far-field spot which changes with time to determine the occurrence of intense cavitation, it can detect the value of the critical intense cavitation pressure non-invasively by the relation between the maximum deflection distance of the ray and the change of the focus acoustic pressure with a high repeatability. By analysing the distribution of the cavitation bubbles in liquid, and the cavitation threshold pressure changing with the external environmental pressure to calibrate the results, it's proved that the feasibility of this way to detect the critical intense cavitation pressure.

Key words geometric optics; the critical intense cavitation pressure; acousto-optic refraction; focused ultrasound

OCIS codes 080.2710; 080.2720; 080.5692; 260.2710

1 引言

超声空化效应是能量密度高度集聚的一种方式,它是指液体中的微小泡核(空化核、空化泡)在声波作用下被激活,表现为泡核的振荡、膨胀、收缩以

至内爆等一系列动力学过程。它能够将声场中低能量密度转变为气泡内部及其周围的高能量密度,在气泡内爆的瞬间和振动过程中引发高压、高温、发光、冲击波等一系列极端物理现象^[1],在现代医学、

收稿日期: 2012-10-17; **收到修改稿日期**: 2012-12-11

基金项目: 国家重大仪器专项(81127901)资助课题。

作者简介: 吕朋(1987—),男,硕士研究生,主要从事激光与聚焦声场相互作用方面的研究。

E-mail: lvpeng332420047@163.com

导师简介: 王华(1962—),男,教授,硕士生导师,主要从事光学信息处理方面的研究。E-mail: wangh@cqmu.edu.cn

(通信联系人)

工业清洗、水处理和探测等^[1~3]领域的工程设计中有着越来越重要的应用。目前对超声空化的应用主要是剧烈空化,剧烈空化是指液体中所存在的大量空化泡在一定的超声波作用下发生内爆的现象,发生剧烈空化时整个空化区域内空化泡的活动复杂剧烈,能够用肉眼观察剧烈空化区域与其他区域的液体透明度具有明显的差别,并出现较大的声响。对于具体物质在确定的条件下,只有声压超过某一数值,才能发生剧烈空化,将这一特定声压值称为临界剧烈空化声压,也就是发生剧烈空化时的阈值声压。如何正确地确定临界剧烈空化声压的大小,已经成为超声基础研究以及工程设计中一个十分迫切和重要的问题。常用的定量检测液体中声压的方法主要有传统的压电水听器^[4]、新型高分子化合物偏氟乙烯(PVDF)水听器^[5]以及光纤水听器^[6],前两种方法只能在低声压条件下进行测量,光纤水听器法虽能测得较高的声压,但该方法在高声压的情况下都会产生一定的偏差,由于测量过程中需要将水听器放入声场中,在一定程度上会对声场产生干扰,水听器的置入会使得该处更加容易发生空化现象,并且高声压条件下容易损坏水听器。由于目前没有较好的定量检测手段,一般认为临界剧烈空化声压也就是空化阈值声压^[7]。

现存的方法尚不能准确稳定地检测临界剧烈空化声压的大小。随着声光相互作用和激光技术在测量方面更加广泛的应用^[8~10],本文提出了基于声光偏转效应的检测临界剧烈空化声压大小的方法,分析了液体中初始空化泡的数量随其半径或体积的分布特征,通过定量检测剧烈空化前激光光束通过声场后,偏转光斑的最大长度和形状变化,来定量反映出液体中临界剧烈空化声压的大小。根据液体中空化泡的分布及变化规律,以及空化阈值声压随着外界环境压强的变化规律对临界剧烈空化声压的测量结果进行标定,证实了该方法的可行性。

2 临界剧烈空化声压的检测原理

对于液体中确定半径的单个空化泡而言,其空化阈值声压是指该空化泡发生内爆时所需的最低声压。声学理论已给出,当液体中的空化泡初始半径为 R_0 时,假设液体拉开的过程为等温过程,且忽略粘滞性及辐射阻尼影响,其空化阈值声压为

$$p_B = p_0 - p_v + \frac{2}{3\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{2\sigma}{R_0}\right)^3 \left(p_0 - p_v + \frac{2\sigma}{R_0}\right)}, \quad (1)$$

式中 p_v 表示气泡内的蒸汽压, σ 表示表面张力系数, p_0 表示液体中的静压强。

根据计算显示,空化阈值声压因液体中本身存在的空化泡半径 R_0 的大小不同而不同, R_0 较大时,空化阈值声压较小,液体中容易发生空化; R_0 较小时,空化阈值声压较大,液体中不易发生空化现象^[1]。

对于半径较小的空化泡,即 $2\sigma/R \gg p_0$, 且 $p_v \ll p_0$ 时,(1)式可近似为

$$p_B \approx p_0 + 0.77 \frac{\sigma}{R_0}. \quad (2)$$

对于某一种确定的初始平衡状态为气液面相交的液体,其内部存在大量的空化泡,空化泡的尺寸应有一定的统计学分布,可认为是遵从某种 Gaussian 曲线描述的钟形分布^[11],液体中半径为 R_0 的空化泡数目最多, R_0 为最可几分布半径且整个曲线关于 $R=R_0$ 对称,如图 1 所示。

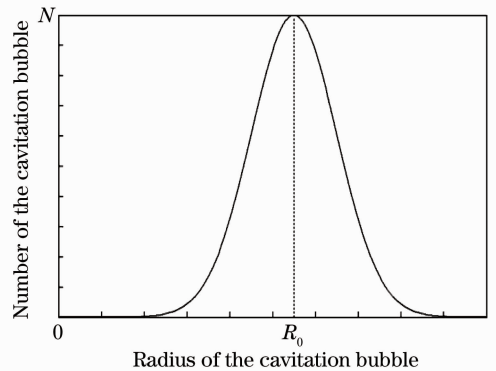


图 1 液体中空化泡的高斯分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the Gaussian distribution of the cavitation bubbles in liquid

对于单个空化泡而言,在较弱的超声波作用下,空化泡随声波的频率做脉动变化,即在声压的负压阶段,空化泡被拉大;在正压阶段气泡又被缩小。对于足够强的超声,当声压的幅值超过空化阈值声压时,空化泡先在声压的负压阶段迅速膨胀,达到最大半径,接着又在正压阶段剧烈压缩,直至内爆。对于一般的液体,由于液体中半径较大的空化泡在较小的声压下就会发生内爆,且该半径的空化泡的数量较少,因此在其发生内爆时只会对其周围的空化泡产生很小的影响,半径较小的空化泡继续在正负声压的作用下被拉大或者缩小。当超声波能量达到一定程度时,初始半径为 R_0 的气泡开始发生内爆,由于液体中该半径的空化泡的数量最多,在其发生内爆时产生的冲击波和高速射流等其他物理效应会影响周围半径更小的气泡发生内爆,进而发生剧烈空

化现象,整个声场内的气泡活动就会变得异常复杂,声能量继续增加,空化的剧烈程度增加。由于空化阈值声压的计算主要是针对确定半径的单个空化泡而言的,只能单一地反映一种空化泡半径条件下气泡发生内爆所需的最低声压,而在实际工程中对于整个声场而言,在发生剧烈空化的临界时刻,由于在声场内存在着多个大小不一、形状各异外加分布不均的空化泡,且这些空化泡的活动相当复杂,因此对于声场内临界剧烈空化声压的检测需要一种非介入式的定量检测方法,而基于声光偏转效应的声场检测方法就满足该条件,该方法的最大特点是对初始声场无任何影响且光线最大偏转量的峰值测量精确度高。因此,提出了基于声光偏转效应检测临界剧烈空化声压的方法。

声光偏转效应是指窄光束(光束宽度小于超声波波长)穿过超声场时,在声场的作用下,介质的折射率将会随时间发生周期性的变化,光束便会偏离原来的传播方向。Lucas等^[12]观察并验证了该效应,基于声光偏转效应的声场测量方法^[13,14]是采用一束直径小于声波波长的激光光束垂直入射到超声场中,由于介质中存在着声场将导致光线发生折射现象,进而根据光线的偏转轨迹计算出光线的偏移量,然后建立最大偏移量与声压的关系。

在整个超声辐照过程中,当输入的声能量较低时,激光光束垂直通过声场时,声场内的空化泡的振荡不会对光的偏转产生影响,所以观察到的投影光斑不会发生晃动。当输入的声能量逐渐增加时,由于声场内发生内爆的半径较大的空化泡的数目相对较少,不会对光束的传播产生影响,此时声场中的折射率梯度增大,光束在声场的偏转角也在增加,投影光斑的长度也在增加。当输入的声能量值继续增加使得声场内声压达到一定阈值时,声压的增大使得大量的空化泡在声压的负压阶段迅速膨胀,达到最大半径,紧接着又在正压阶段急剧压缩,发生内爆,声场内大量的空化泡发生内爆,出现剧烈空化,使得光束在通过声场时发生了剧烈的散射现象,投影光斑为弥散斑,整个光斑处于不停的晃动之中。由此可知,光斑开始出现剧烈晃动前即第一次出现散射情况前的声压值也就是临界剧烈空化声压,此时对应的投影光斑的长度也达到最大值。由于临界剧烈空化现象发生得很快,人眼或者一般的摄影装置很难捕捉到最大光斑图像,在实验中需要使用高速摄影装置进行剧烈空化前的最大光斑图像的采集。高速摄影装置在较低的采集帧频时一定程度上影响着

测量结果,采集到的光斑的长度并不是最大值,它随着采集帧频的增加而增加;当采集帧频增加到一定阈值范围时,所采集到光斑的长度不再随着采集帧频的增大而增长,能够获得剧烈空化前的最长光斑图像。因此基于声光偏转效应方法检测声场具有可行性和优越性,能够通过声光偏转效应检测临界剧烈空化声压的大小。

3 实 验

3.1 实验材料及装置

实验系统如图2所示,换能器为压电式高强度聚焦超声换能器(重庆海扶技术有限公司生产),中心频率为446 kHz,换能器孔径半径为110 mm,焦距为150 mm,-6 dB的焦域大小经计算为3.15 mm(横向,焦平面上)×8.88 mm(纵向,即声轴线方向)。将换能器固定于位移调节装置上,并置于装满脱气水的900 mm×350 mm×650 mm(长×宽×高)透明的长方体玻璃水槽中,水槽底部铺有一层尖劈状(厚度约为10 mm)的吸声材料。脱气水的氧浓度为 (2.7 ± 0.4) mg/L,温度为 (20 ± 0.5) °C。将氩氦激光器发出的光束调成平行光束,使光束的传播方向与声波的传播方向垂直。开启换能器并调节至某一功率,根据换能器的几何焦距,大致调节换能器的位置,使得激光光束通过聚焦声场。根据文献^[10]可知当激光光束恰好通过换能器的焦点位置时,投影光斑为对称的椭圆形光斑,因此可以根据投影光斑的变化情况逐步微调使激光光束恰好通过换能器的焦点位置。在给定的高功率条件下,当激光光束通过高强度聚焦超声换能器的焦点时,光束会向着折射率梯度增大的方向偏转,进而在观察屏上可以观察光斑的变化情况,直至发生剧烈空化。发生剧烈空化时,整个焦域呈不透明的白色且伴有较

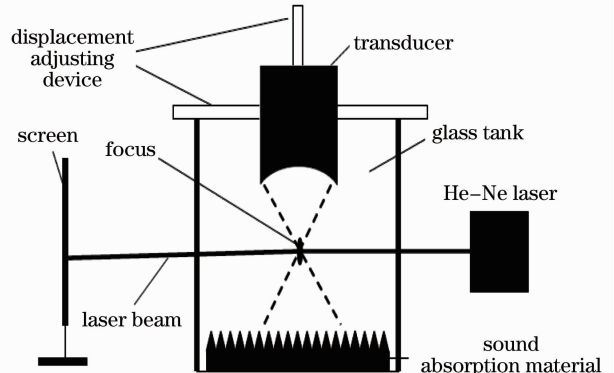


图2 实验简易装置图

Fig. 2 Diagram of experimental installation

大声响。采用高速摄影装置(Photron-Fastcam SA4)选择合适的帧数进行光斑图像的采集,然后在计算机上读取光斑长度。为了消除杂光对整个实验的影响,水槽的四周贴满黑纸,只在光束的传播路径上开两个小孔,不影响光束的传播。

3.2 实验结果

图3所示为光斑经声场调制后的时序图。在实验中发现,当给换能器施加较高的电功率时,投影光斑会在较短的时间内达到最长光斑,由于焦域处的空化泡数目较多且活动复杂会对超声波的传播产生

一定的影响,因此光斑的长度不再随着功率的增加而增长,而是维持之前的最长光斑这种状态几毫秒,然后由于剧烈空化现象的发生,光斑开始闪动,最后形成弥散斑。因此对于较低的采样频率(如图3中采样频率为125 frame/s)无法确定每一次采集所获得的光斑就是最长光斑图像,而对于较高的采样频率(如图3中采样频率为250 frame/s、500 frame/s),由于其采样周期短,这样能保证每一次采集都会至少获得一张最长光斑图像。本实验所采用的采样频率为500 frame/s。

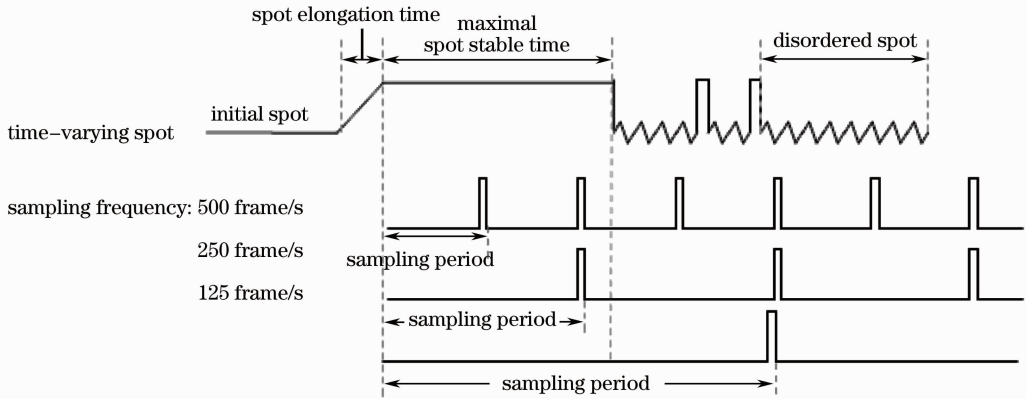


图3 光斑经声场调制后的时序图

Fig. 3 Sequence diagram of the spot after the acoustic field modulation

图4为整个实验过程中通过高速摄影装置所采集到的部分光斑图像。图4(d)为剧烈空化前所采集到的长轴最长的椭圆形光斑,从计算机上读出光束的最大偏转距离,经过多次实验所得的平均最大偏转距离 $d_{max} = 30 \text{ mm}$,误差不超过5%。对于已知的光线最大偏转距离与高强度聚焦超声焦点声压变化关系的理论模型^[10]。一方面在实验过程中能够采集到剧烈空化前任意时刻稳定的光斑图像,剧烈空化后开始出现弥散斑;另一方面由于光的频率很

高,而空化引起的机械对流相对于光的频率非常慢,因此可以获得剧烈空化前光斑的瞬时图像。基于以上两方面,能够通过上述理论模型计算焦点处临界剧烈空化声压的大小,具体计算公式为

$$P_F = \frac{nad_{max}}{1.26\pi ksb}, \quad (3)$$

其中 P_F 为焦点声压的大小, d_{max} 为光束通过聚焦换能器焦点后的最大偏转距离, n 为介质的折射率, a 和 b 分别为换能器的孔径半径和曲率半径, k 为声压

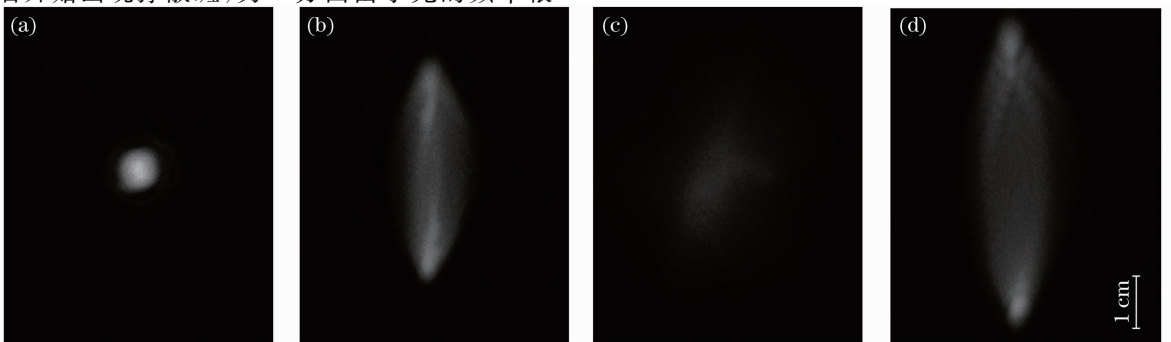


图4 实验中所采集的光斑图像。(a)无声场时;(b)存在声场时;(c)剧烈空化时所采集到的光斑;
(d)剧烈空化前所采集到的最长光斑

Fig. 4 Spot capture in the experiments. (a) No acoustic field; (b) acoustic; (c) violent cavitation;
(d) longest spot capture before the violent cavitation

梯度与介质折射率的正比系数, s 为换能器焦点与观察屏之间的距离。已知水的折射率为 1.33, $k = 1.5 \times 10^{10} \text{ m}^2/\text{N}$, 换能器焦点到观察屏的距离 $s = 4.2 \text{ m}$, 进而根据(3)式计算出已知条件下临界剧烈空化声压为 $1.18 \times 10^7 \text{ Pa}$ 。

4 标 定

当液体中发生剧烈空化时, 会有大量的气泡发生内爆, 同时也会引发高温、高压、发光和冲击波等一系列极端物理现象, 这些现象已成为近年来超声空化研究的热点内容, 因此确定临界剧烈空化声压的大小就显得尤为重要。由于目前的检测手段无法稳定检测出发生临界剧烈空化时的声压大小, 空化阈值声压是对单一半径的空化泡的内爆声压进行计算, 临界剧烈空化声压是在实际液体中存在各种半径空化泡的条件下, 对最可几分布半径的空化泡发生内爆时的声压进行计算, 因此通过分析液体中空化泡的分布随外界环境压强的变化规律, 以及最可几分布半径空化泡的空化阈值声压随外界环境压强的变化情况, 来对临界剧烈空化声压的检测进行标定。

当增大外界环境压强时, 施加在液体中原本半径为 R_0 的空化泡上的压强也在增加, 因此在空化泡所能承受的范围之内, 空化泡在外界环境压强的作用下将会缩小, 图 1 中以 R_0 为轴对称的整个 Gaussian 曲线将会左移^[11]。由图 5 可以看出, 随着施加在液体上外界环境压强值不断变大时, 整个 Gaussian 曲线会不断向左移动, 液体含量最多的空化泡半径也在不断减少, 即 $R_3 < R_2 < R_1 < R_0$ 。

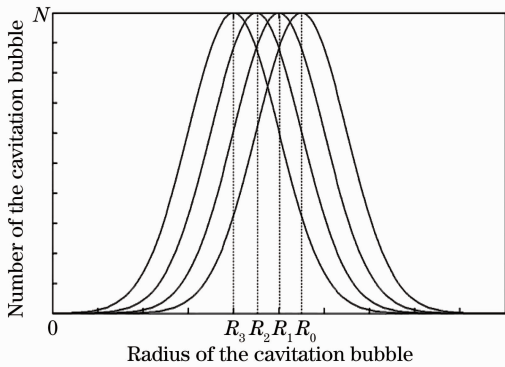


图 5 施加外界环境压力条件下液体中空化泡的分布变化示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the change of distribution of the cavitation bubbles in liquid under the condition of increasing the external environmental pressure

假设在一定的外界环境压强的变化范围内, 空化泡在膨胀与压缩的全过程中一直保持球形且整个过程为等温过程, 根据 Boyle 定律可知空化泡的半径 R 与外界环境压强 p 的关系为

$$R^3 p = C, \tag{4}$$

其中 C 为常数。对于脱气水而言, 水中所含的空化泡的半径相对较小, 因此将(4)式代入(2)式可以得出

$$p_B = p + 0.77 \frac{\sigma}{\sqrt{C}} \sqrt[3]{p}, \tag{5}$$

因此可以得出空化阈值声压 p_B 与外界环境压强 p 的大致关系如图 6 所示。

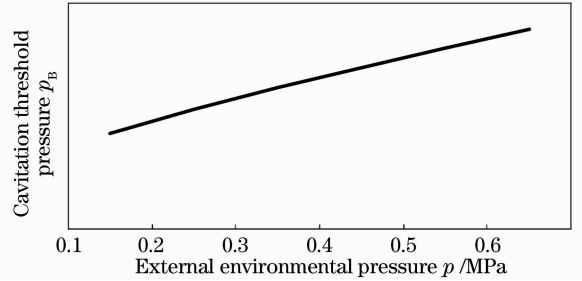


图 6 空化阈值声压 p_B 随外界环境压强 p 的变化趋势图

Fig. 6 Trend chart of the cavitation threshold pressure p_B changing with the external environmental pressure p

由图 6 可知随着外界环境压强的增加, 其空化阈值声压在图示范围内呈线性增加。图 7 为存在外界环境压强条件下的实验装置图。基于实验因素以及安全因素的考虑只进行了 0.1 ~ 0.5 MPa 的加压实验, 该实验步骤与上述实验相同, 均是通过高速摄影装置来获取实验图像, 进而在计算机上进行数据读取。

图 8 为所施加外界环境压强分别为 0 ~ 0.5 MPa 六种情况下, 临界剧烈空化声压与外界环

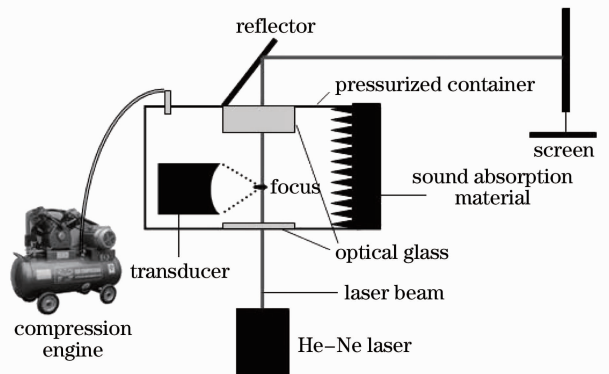


图 7 施加外界环境压强条件下的实验装置图

Fig. 7 Diagram of experimental installation under the condition of increasing the external environmental pressure

境压强的变化情况,从图 8 可知,在不施加外界环境压强的条件下,所获得的临界空化剧烈声压与之前实验中的结果相同,可见此实验重复性高。

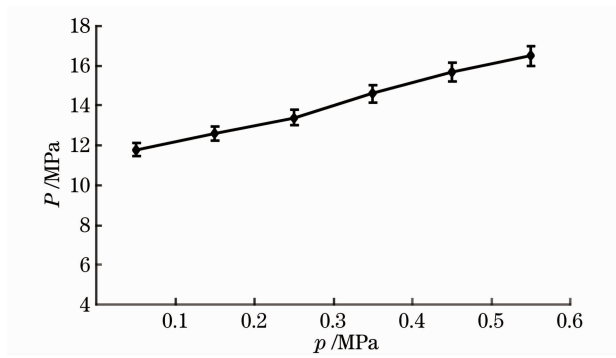


图 8 临界剧烈空化声压 P 随外界环境压强 p 的变化曲线

Fig. 8 Curves of the critical intense cavitation pressure P changing with the external environmental pressure p

每一个最大偏转距离对应着一个临界剧烈空化声压值。随着外界环境压强的增加,其最大偏转距离也在增加,相应的临界剧烈空化声压也在增加,在外界环境压强为 $0\sim 0.6$ MPa 的条件下临界剧烈空化声压 P 随外界环境压强 p 二者呈线性关系,各个压力条件下所获得临界空化剧烈声压的大小偏差均不超过 5%。从图 8 也可得到,在一定的外界环境压强范围内,临界剧烈空化声压与外界环境压强的曲线(图 8)和空化阈值声压与外界环境压强的变化趋势曲线(图 6)类似都是呈线性增加的,因此证实了运用声光偏转效应检测临界剧烈空化声压这种方法的可行性。

5 结 论

提出了一种新的基于声光偏转效应检测液体临界剧烈空化声压的方法。以宽度小于声波波长的光束在通过聚焦超声焦点所引起的光束偏转后光斑长度的变化作为特征量,运用高速摄影装置能够得到剧烈空化前的最大光斑长度,进而计算出临界剧烈空化声压,重复性高。分析了液体中空化泡及空化阈值声压随着外界环境压强的变化规律,对临界剧烈空化声压的大小进行标定,证实了该方法的可行性。在实际应用中,通过测定临界剧烈空化声压,能够快速准确地分析判断出换能器的工艺、能量输出

是否达到要求,也可以比较同种液体的含气量以及污染程度。

参 考 文 献

- 1 Feng Ruo. Ultrasonics Handbook [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1999, 27~28, 655~662, 706~717
冯若. 超声手册[M]. 南京: 南京大学出版社, 1999, 27~28, 655~662, 706~717
- 2 Gong Anhua, Luo Yatian, Li Duanlin. Ultrasonic technology and its application in water treatment [J]. *Sichuan Chemical Industry*, 2006, **9**(1): 48~50
龚安华, 罗亚田, 李端林. 超声波技术及其在水处理中的应用[J]. *四川化工*, 2006, **9**(1): 48~50
- 3 Shen Qimao. The research and application of ultrasound cavitation[J]. *China Medical Device Information*, 2002, **8**(2): 22~24
沈祺茂. 超声空化的研究及应用[J]. *中国医疗器械信息*, 2002, **8**(2): 22~24
- 4 A. S. De Reggi, S. C. Roth, J. M. Kenney *et al.*. Piezoelectric polymer probe for ultrasonic application[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1981, **69**(3): 853~859
- 5 M. Platte. A polyvinylidene fluoride needle hydrophone for ultrasonic application[J]. *Ultrasonics*, 1985, **23**(3): 113~118
- 6 Yufeng Zhou, Liang Zhai, Rebecca Simmons *et al.*. Measurement of high intensity focused ultrasound fields by a fiber optic probe hydrophone [J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2006, **120**(2): 676~685
- 7 Hao Feng, Gustavo Barbosa-Canovas, Jochen Weiss. *Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing*[M]. Berlin: Springer, 2010. 25
- 8 Chen Chen, Shi Bangren, Guo Lijun *et al.*. Analysis on acoustic surface wave and acousto-optic interactions in silica waveguide Bragg devices[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(6): 0613001
陈晨, 石邦任, 郭丽君等. SiO_2 波导布拉格器件中声表面波及声光相互作用分析[J]. *光学学报*, 2012, **32**(6): 0613001
- 9 He Yuanxing, Li Xinyang. Far-field focal spot measurement based on diffraction grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0208001
贺元兴, 李新阳. 基于衍射光栅的远场焦斑测量新方法[J]. *中国激光*, 2012, **39**(2): 0208001
- 10 Zhou Huiting, Lü Peng, Wang Hua *et al.*. Measurement of acoustic pressure of the focused ultrasound at focus based on acousto-optic refraction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(9): 0908001
周慧婷, 吕朋, 王华等. 基于声光折射的聚焦超声焦点声压检测研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(9): 0908001
- 11 G. Cum, G. Galli, R. Gallo *et al.*. Role of frequency in the ultrasonic activation of chemical reactions[J]. *Ultrasonics*, 1992, **30**(4): 267~270
- 12 R. Lucas, P. Biquard. Proprietes optiques des milieu solids et liquid soumis aux vibrations elastiques ultra sonores [J]. *J. Phys. Radium.*, 1932, **3**(7): 464~477
- 13 J. Kolb, A. P. Loeber. The study of a sound field by means of optical refraction effects[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1954, **26**(2): 249~251
- 14 Ian Butterworth, Adam Shaw. Realtime acousto-optical QA methods for high intensity fields [C]. *Ultrasonic Industry Association Symposium (UIA)*, 2010. 1~5