

激光空泡在文丘里管中运动的动力学特性*

李小磊 秦长剑 张会臣†

(大连海事大学交通运输装备与海洋工程学院, 大连 116026)

(2013年9月3日收到; 2013年10月17日收到修改稿)

以水为工作介质, 在不同文丘里管入口压力下, 利用YAG激光器产生的激光轰击水中的金属靶材产生空泡, 借助高速摄像系统记录激光空泡在文丘里管中的运动过程, 并采用流体动力学模拟对文丘里管中的流场特性和空泡的溃灭特性进行分析. 结果表明: 激光空泡在文丘里管中的运动, 其形状变化可分为产生阶段、挤压阶段、溃灭初始阶段和溃灭阶段等四个阶段. 空泡的溃灭取决于流场状态, 当流动为层流时, 空泡不发生溃灭; 当流动为湍流时, 空泡发生溃灭, 且湍流程度越剧烈, 溃灭现象越显著. 搭建的激光空泡生成与运动系统能够实现空泡的定点溃灭.

关键词: 激光空泡, 文丘里管, 湍流, 空泡动力学

PACS: 47.55.dd, 47.55.df

DOI: 10.7498/aps.63.054707

1 引言

空泡广泛应用于化学反应催化^[1,2]、生物医学^[3,4]和传热传质^[5,6]等许多领域, 因此, 空泡生长^[7-9]和溃灭过程^[10-12]中的动力学特性已引起了广泛的关注. 其中, 激光产生空泡的方法, 容易控制空泡产生的位置和时间, 具有高度的球对称性, 是研究空泡特性的有效手段. 宗思光等^[13]的研究表明, 对于不同的液体介质中的激光空泡, 激光等离子体空泡膨胀、空泡溃灭辐射冲击波强度主要与液体的黏性系数相关, 激光空泡发光与最终溃灭是同相位的. 贺杰等^[14,15]对不同表面张力液体中激光空泡脉动及溃灭特性进行的研究表明, 表面张力延缓了空泡的膨胀过程, 加速了空泡的溃灭, 表面张力对空泡溃灭的影响要强于对膨胀的影响. 王雨虹等^[16]通过数值计算与实验研究, 揭示了吸收的激光脉冲能量与激光空泡的半径、泡内压力和温度之间的对应关系, 以及吸收的激光脉冲能量不变时半径、压力和温度的变化规律. Han等^[17]通过基于光束偏转的光纤传感器研究了激光空泡的

振荡特性, 空泡内部的温度和压力变化过程接近绝热过程, 且空泡第一次振荡将导致泡内气体显著减少. 赵瑞等^[18,19]研究了空泡内气含量和液体黏性对激光空泡大小脉动特性的影响, 随着脉动次数的增加, 空泡最大泡半径随含气量的增加而增大. Li等^[20]研究了环境压力对激光空泡最大半径和破裂的影响, 当环境压力增加时, 空泡的最大半径和存在时间线性减小. Liu等^[21]利用光束检测器研究了温度对空泡振荡特性的影响, 空泡的寿命随温度升高而增加. Yang等^[22]的研究表明, 固体壁面的存在导致空泡溃灭时呈现非球型特征, 空泡从第一次振荡到第二次振荡将损失总能量的三分之二.

目前, 大多数研究集中在空泡的产生方法, 空泡产生时的动力学特性以及外部因素对其的影响, 针对流场对空泡溃灭影响的实验研究很少, 本文利用自行设计的空泡定点产生和定点溃灭的实验系统着重研究了空泡经过文丘里管流场的动力学特性变化, 并结合流体动力学模拟得到了空泡溃灭的临界条件, 研究结果可为空泡的主动控制和有效利用提供技术支持.

* 国家自然科学基金(批准号: 51275064, 50975036)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: hczhang@dlmu.edu.cn

2 实验

2.1 实验装置

实验装置框图如图1所示, 包括泵、流量阀、精密数字压力表、YAG激光器、文丘里管组件、高速摄影系统(CCD)和水箱。其中管道直径为4 mm,

YAG激光器的激光参数设定为脉宽0.4 ms, 电流强度150 A, 此时激光的预设单点能量为200 J, 高速摄影机的拍摄帧频设定为 2×10^4 fp/s, 分辨率为 512×96 .

文丘里管组件包括了金属靶材, 有机玻璃板和文丘里管三个部分, 采用胶黏的方法连接而成, 如图2所示, 其中文丘里管的结构尺寸如图3所示。

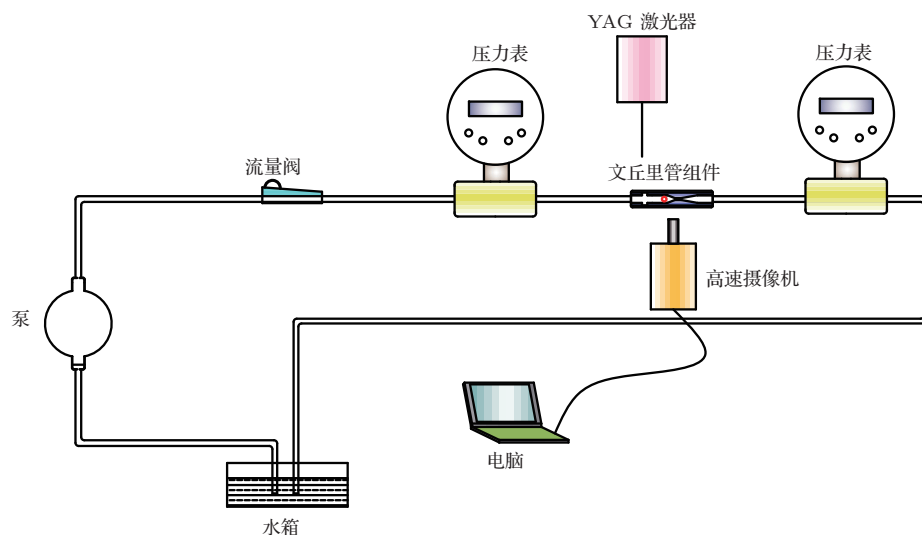


图1 实验系统图

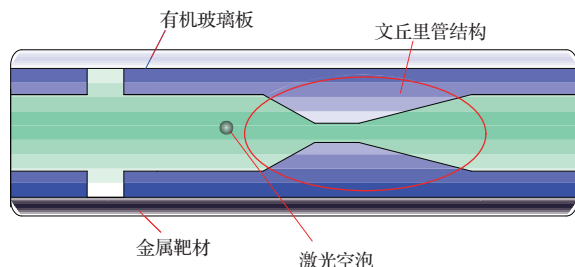


图2 文丘里管组件结构

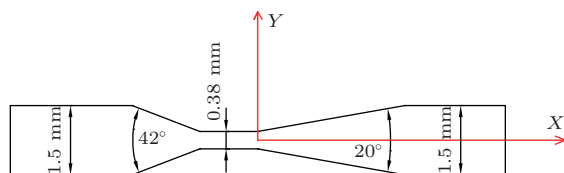


图3 文丘里管的几何尺寸

2.2 实验过程

实验中, YAG激光器产生的激光轰击金属靶材产生空泡, 产生的空泡随着流体流经文丘里管, 利用CCD记录激光空泡经过文丘里管的过程。通

过调节流量阀, 使文丘里管的入口压力分别为20 kPa, 25 kPa, 30 kPa, 40 kPa, 50 kPa, 60 kPa。同时, 借助量筒和秒表测量对应的流速。

2.3 数值模拟

采用FLUENT前处理软件GAMBIT对文丘里管内流体进行建模和网格划分, 共划分四边形网格31750个。对其流场特性进行数值模拟中选用双精度模式, 物理模型选取volume of fluid(VOF)模型, 采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型和空泡动力学模型, 压力速度耦合方式选用SIMPLE方法。

设定与实验研究相对应的入口压力, 由实验数据可以得到对应的湍流强度、空泡大小和空泡位置, 然后在物理模型上引入与实验对应的初始空泡, 模拟空泡经过文丘里管的全过程。其中雷诺数采用下式计算:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu}, \quad (1)$$

式中 v 为平均速度(m/s), L 为水力直径(m), ρ 为流体密度(m^3/s), μ 为液体黏度($\text{Pa}\cdot\text{s}$)。

3 结果与讨论

不同入口压力条件下对应的出口压力、流量以及喉部雷诺数如表 1 所示. 由表 1 可以看出, 出口压力、流量以及喉部雷诺数与入口压力基本成线性变化. 根据工程应用中的临界雷诺数 $Re_c = 2320$, 入口压力小于等于 25 kPa 时, 流动为层流, 当入口压力大于 30 kPa 时, 流动为湍流, 且入口压力越大, 湍流强度越大.

表 1 不同入口压力对应的出口压力、流量以及喉部雷诺数

入口压力 P_1/kPa	出口压力 P_2/kPa	流量 $Q/(\text{ml/s})$	喉部 雷诺数 Re
20	13.5	2.1	1930.0
25	15.5	2.3	2101.5
30	20.7	2.7	2491.3
40	28.3	3.1	2820.6
50	34.2	3.8	3484.7
60	40.3	4.3	3911.9

图 4 和图 5 分别为入口压力为 20 kPa 时实验测试和数值模拟得到的激光空泡的运动过程. 可以看出, 空泡经过文丘里管只发生变形, 不会发生破裂. 当入口压力为 25 kPa 时, 空泡经过文丘里管后会破裂出一个小空泡, 但空泡溃灭的现象不剧烈, 如图 6 和图 7 所示. 当入口压力为 30 kPa 时, 空泡

经过文丘里管后会破裂成三个空泡, 但空泡溃灭的现象仍不太剧烈, 如图 8 和图 9 所示. 当入口压力为 40 kPa 时, 空泡经过文丘里管后会破裂成一群空泡, 空泡溃灭的现象比较剧烈. 当入口压力为 50 kPa 时, 空泡经过文丘里管后同样会破裂成一群空泡, 空泡溃灭的现象更为剧烈. 当入口压力为 60 kPa 时, 空泡经过文丘里管后会破裂成一群空泡, 空泡溃灭的现象特别剧烈, 如图 10 和图 11 所示.

由图 4—11 可知, 当入口压力小于 25 kPa 时, 空泡不发生溃灭, 当入口压力大于 30 kPa 时, 空泡发生溃灭, 且空泡溃灭的剧烈程度随着入口压力的增加而增加, 模拟结果与实验结果相一致. 可以看出, 流动为层流时, 空泡不发生溃灭; 流动为湍流时, 空泡发生溃灭, 且入口压力越大, 湍流强度越大, 空泡的溃灭现象也越加明显. 激光空泡产生后, 经过一段距离后到达图示的初始位置, 此时空泡处于稳定状态, 呈球状, 空泡的初始位置会略有不同, 可能偏向上壁面或下壁面, 但是当空泡经过尺寸较小的文丘里管喉部之后, 位置均相同, 所以空泡的初始位置并不会影响空泡在扩散段的变化, 实验结果不会受到空泡初始位置的影响.

对实验结果进一步研究可以发现, 空泡的动力学特性与流场的流动状态密切相关, 流场的流动状态决定了空泡的溃灭与否, 且流场的湍流强度决定了空泡溃灭现象的剧烈程度.

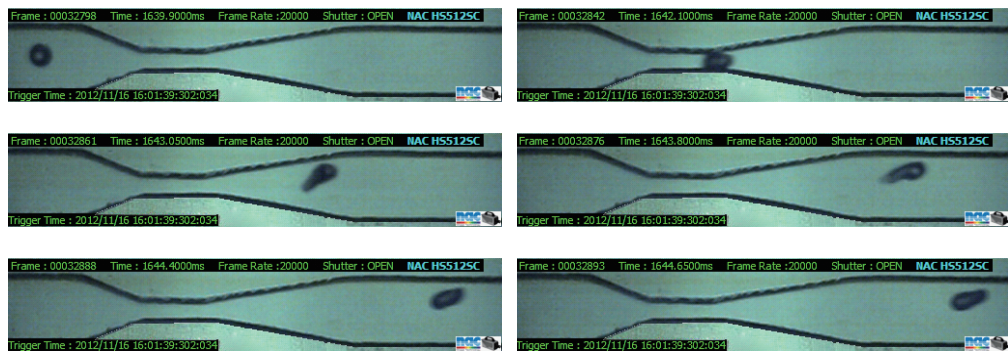


图 4 激光空泡的运动过程 ($P_1 = 20 \text{ kPa}$)

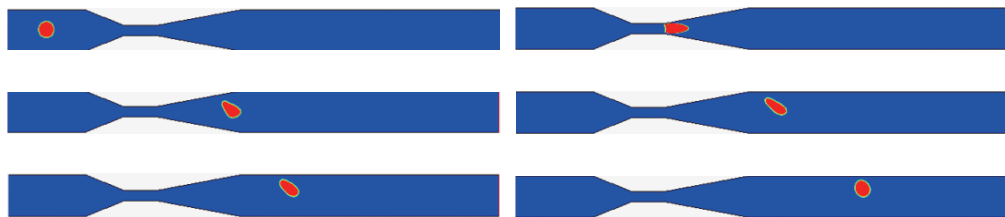


图 5 激光空泡的运动过程的数值模拟 ($P_1 = 20 \text{ kPa}$)

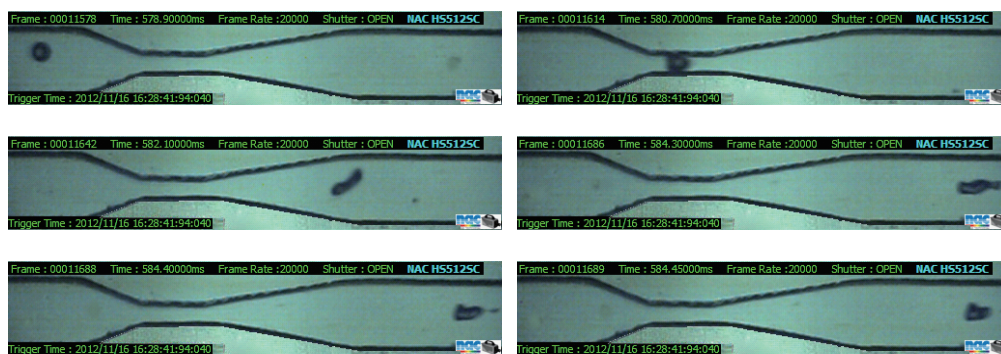


图6 激光空泡的运动过程 ($P_1 = 25$ kPa)



图7 激光空泡的运动过程的数值模拟 ($P_1 = 25$ kPa)

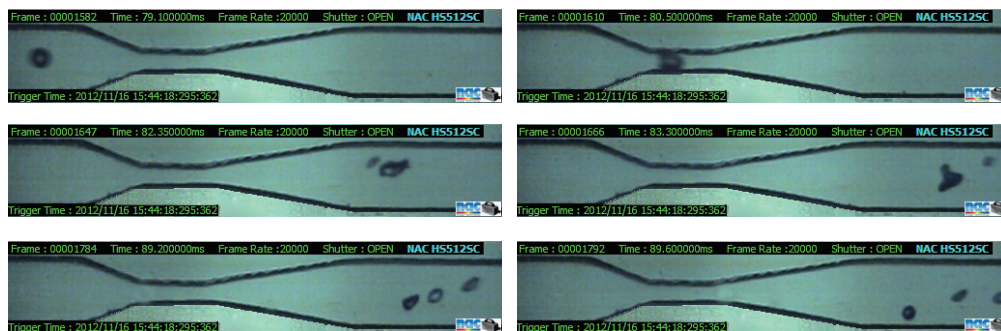


图8 激光空泡的运动过程 ($P_1 = 30$ kPa)

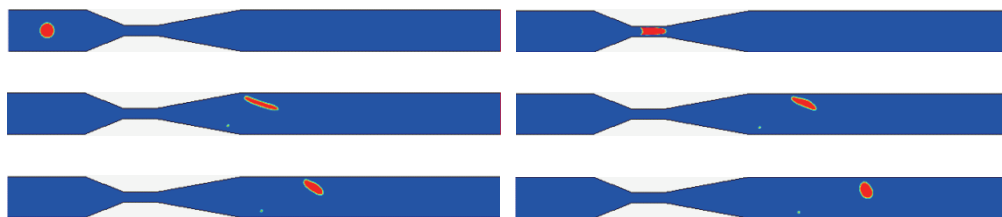


图9 激光空泡的运动过程的数值模拟 ($P_1 = 30$ kPa)

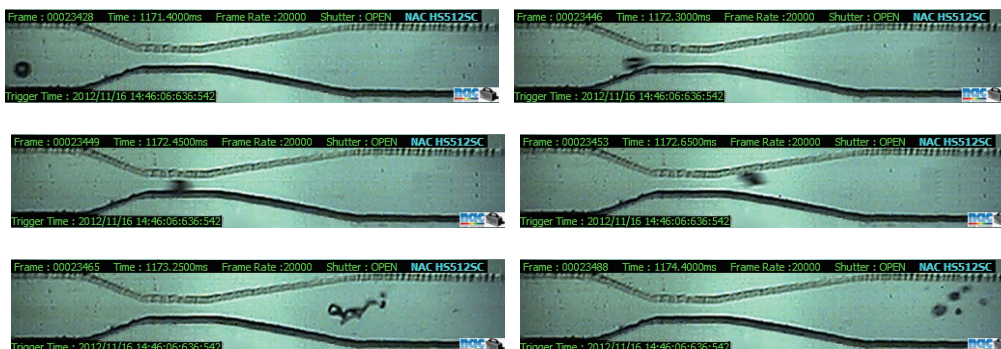


图10 激光空泡的运动过程 ($P_1 = 60$ kPa)

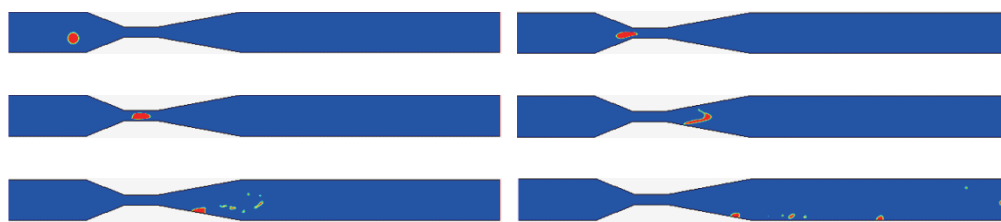
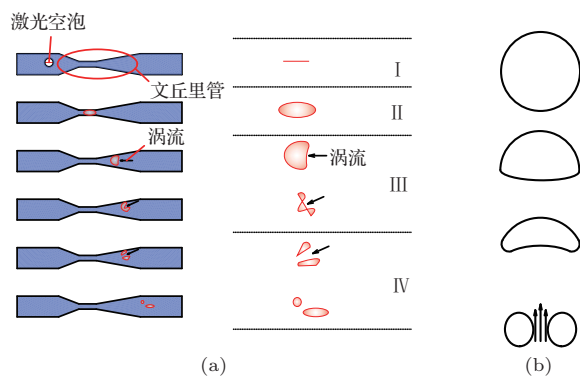
图 11 激光空泡的运动过程的数值模拟 ($P_1 = 60$ kPa)

图 12 空泡溃灭的过程

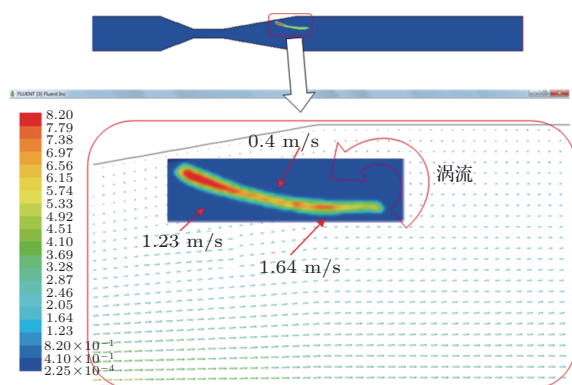


图 13 空泡溃灭的机理

空泡在固体壁面附近溃灭的末期, 空泡的外形将成“心”的形状, 出现这种情况是因为空泡收缩时, 泡壁周围的液体向空泡中心运动, 而近壁面处的液体由于受到边壁限制, 其运动速度将比其他部分小^[23]. 本文中空泡的溃灭过程如图 12 (a) 所示, 空泡经过文丘里管的过程中, 其形状变化主要分为四个阶段, 第 I 阶段为空泡产生阶段, 空泡刚刚进入文丘里管, 此时空泡周围的流场分布比较规则, 所以空泡形状为球型; 第 II 阶段为挤压阶段, 由于空泡外形尺寸大于文丘里管喉径, 所以空泡被迫发生挤压变形, 成椭球状; 第 III 阶段为溃灭初始阶段, 空泡进入文丘里管扩散段, 空泡只受泡壁周围湍流

流场的影响, 空泡前后两侧的速度和压力不平衡, 空泡一侧被挤压, 继而凹陷, 即呈现出“心”的形状; 第 IV 阶段为溃灭阶段, 随着空泡位置的后移, 空泡两侧的速度和压强差将增大, 当空泡被挤压的程度超过了其能够承受的极限, 空泡就会溃灭成两个或是多个小空泡. 可以看出, 空泡在文丘里管中的运动过程中, 其溃灭过程与流场状态密切相关. 这个过程与 Knapp 等^[24] 阐明的空泡在压力梯度区的溃灭方式完全一致, 如图 12 (b) 所示, 空泡随主流流动时, 它先是在高压侧被压扁, 然后继续凹陷, 最后发生溃灭.

以入口压力 $P_1 = 50$ kPa 为例, 对处于第 III 阶段的空泡附近的流场进行详细分析, 如图 13、图 14 和图 15 所示, 此时空泡所处位置的湍流强度 (Turbulent Intensity) 为 88.7%—97.3%, 流场的速度分布在 0—1.64 m/s 之间, 在空泡左后侧, 流体的速度方向均向右, 速度大小约为 1.23 m/s—1.64 m/s, 在空泡的右前侧, 流体的速度大小约为 0.4 m/s—1.23 m/s, 速度方向并不是单一的指向右侧, 从图 15 中, 可以清晰的看出, 此时空泡正处于流场中的涡流区域, 随着空泡前后速度不平衡的加剧, 当这种不平衡超出空泡的承受极限时, 空泡发生溃灭. 反之, 若此时流场为层流, 流体速度方向基本上均指向右侧, 流场中不存在如图 15 所示的涡流区域, 空泡前后区域的速度大小会有所不同, 这将导致空泡的形状发生变化, 但形变的范围并不能超出空泡的承受极限, 所以空泡并不会发生溃灭.

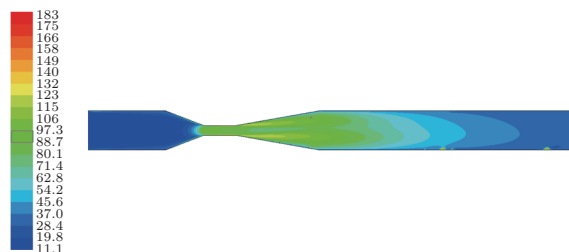


图 14 流场的湍流强度分布图

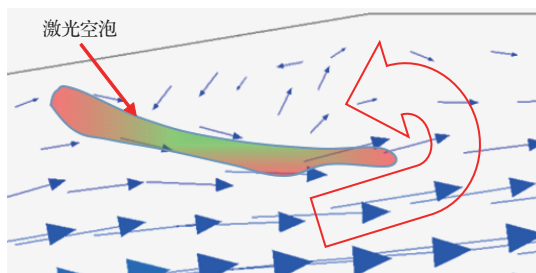


图 15 空泡周围的流场矢量图

此外, 流场的湍流强度越大, 空泡的溃灭现象越明显, 这与蔡军等^[25,26]的研究结果相一致, 证明了湍流作用对空泡动力学特性至关重要的作用.

通过表 1 的数据可以拟合得到喉部雷诺数与入口压力之间的线性关系式为 $Re = 50.4417P_1 + 898.4368$, 通过临界雷诺数得到的空泡发生溃灭的临界入口压力为 $P_{1c} = 28.2$ kPa, 即当入口压力高于 28.2 kPa 时, 空泡经过文丘里管时会发生溃灭. 实验过程中, 当入口压力 $P_1 = 25$ kPa 时, 空泡发生了轻微溃灭, 主要是因为实际工况条件下, 文丘里管入口处的压强存在一定的扰动, 且此时流场处于层流和湍流的过渡状态, 所以空泡发生了轻微溃灭. 对于处于湍流状态的流场, 扰动的存在将加剧空泡的溃灭程度, 而对于雷诺数较小的层流流场, 扰动的存在也会一定程度上影响空泡的变化, 但这种影响有限, 不能导致空泡溃灭.

4 结 论

利用脉冲激光轰击浸没于水中的金属靶材产生空泡, 在不同的入口压力下将产生的激光空泡引入到文丘里管流场中, 研究发现, 当入口压力小于 25 kPa 时, 空泡经过文丘里管流场不会发生溃灭, 当入口压力大于 30 kPa 时, 空泡会发生溃灭, 这个过程中空泡形状主要经历产生、挤压、溃灭初始和溃灭四个阶段. 空泡的溃灭取决于流场的流动状态, 当流动为层流时, 空泡不发生溃灭; 当流动为湍流时空泡发生溃灭, 且湍流程度越剧烈, 溃灭现象越明显.

参考文献

[1] Azher N E, Gourich B, El Azher N, Vial C, Belhaj Soula-mi M, Ziyad M, Zoulalian A 2007 *Chem. Eng. Process.*

46 139

[2] Toshinori M, Masaki S, Hiroshi K 2012 *Mater. Lett.* **77** 110

[3] Liu Y 2007 *Med. Eng. Phys.* **29** 390

[4] Dhiman C, Pankaj J, Kausik S 2005 *Phys. Fluids* **17** 1006

[5] Schneider B, Koşar A, Peles Y 2007 *Int. J. Heat Mass Transfer* **50** 2838

[6] William B, Buddhika N, Václav T, Hemaka H C B, Olu-muyiwa A 2009 *Food Bioprod. Process.* **87** 215

[7] Ying C F, Li C, Xu D L, Deng J J 2008 *Chin. Phys. Soc.* **17** 0927

[8] Koichi T, Ai H, Takanori N, Satoko F, Daisuke K 2011 *Chem. Eng. Sci.* **66** 3172

[9] Hirofumi S, Shosaku I, Satoyuki K 2008 *Exp. Therm. Fluid Sci.* **32** 1132

[10] Wang H, Zhang Z Y, Yang Y M, Zhang H S 2010 *Chin. Phys. Soc.* **27** 054703

[11] Zhang A M, Yao X L 2007 *Chin. Phys. Soc.* **17** 0927

[12] Liu X B, Zhang J R, Li P, Le V Q 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 064701

[13] Zong S G, Wang J A, Ma Z G 2010 *Acta Optica Sinica* **30** 885 (in Chinese) [宗思光, 王江安, 马治国 2010 光学学报 **30** 885]

[14] Liu X M, He J, Lu J, Ni X W 2007 *Chin. Phys. Soc.* **17** 2574

[15] He J, Liu X M, L J, Ni X W 2009 *Chinese J. Lasers* **36** 342 (in Chinese) [贺杰, 刘秀梅, 陆建, 倪晓武 2009 中国激光 **36** 342]

[16] Wang Y H, Wang J A, Ren X C 2009 *Acta Phys. Sin.* **12** 8372 (in Chinese) [王雨虹, 王江安, 任席闯 2009 物理学报 **12** 8372]

[17] Han B, Bo Y, Rui Z 2010 *Eur. J. Mech. B-Fluid.* **29** 430

[18] Zhao R, Xu R Q, Liang Z C, Lu J, Ni X W 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8400 (in Chinese) [赵瑞, 徐荣青, 梁忠诚, 陆建, 倪晓武 2009 物理学报 **58** 8400]

[19] Zhao R, Xu R Q, Shen Z H, Lu J, Ni X W 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4783 (in Chinese) [赵瑞, 徐荣青, 沈中华, 陆建, 倪晓武 2006 物理学报 **55** 4783]

[20] Li B B, Zhang H C, Lu J, Ni X 2010 *Opt. Laser. Technol.* **43** 1499

[21] Liu X M, Hou Y F, Liu X H, Ni X W 2011 *Optik* **122** 1254

[22] Yang Y X, Wang Q X, Ke T S 2013 *Ultrason. Sonochem.* **20** 1098

[23] Chen X, Xu R Q, Shen Z H 2005 *Chinese J. Lasers* **32** 331 (in Chinese) [陈笑, 徐荣青, 沈中华 2005 中国激光 **32** 331]

[24] Knapp R T, Daily J W, Hammit F G 1970 *Cavitation* (New York: McGraw-Hill) p578

[25] Cai J, Huai X L, Li X F 2009 *J. Therm. Sci.* **18** 338

[26] Cai J, Huai X L, Li X F 2010 *Chin. Sci. Bull.* **55** 857 (in Chinese) [蔡军, 淮秀兰, 李勋锋 2010 科学通报 **55** 857]

Dynamic characteristics of laser-induced bubble moving in venturi^{*}

Li Xiao-Lei Qin Chang-Jian Zhang Hui-Chen[†]

(Transportation equipments and Ocean Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning, 116026, China)

(Received 3 September 2013; revised manuscript received 17 October 2013)

Abstract

Laser-induced bubble was generated by YAG laser bombarding the metal target in the water at different venturi inlet pressures. The movement of laser-induced bubble in venturi was recorded by a high-speed video system. Characteristics of flow field in venturi and bubble collapse were analyzed by computational fluid dynamics. Results show that the process of laser-bubble moving in venturi can be classified into four periods: generation, extrusion, initial collapse, and collapse period. Bubble collapse depends on the state of flow field. Bubble does not collapse when the flow is in laminar state. However, bubble collapses when the flow is in turbulent state. The collapse phenomenon becomes prominent with increasing turbulence intensity. The bubble collapse at a fixed point can be realized in the laser-bubble generation and movement system.

Keywords: laser-induced bubble, venturi, turbulence, bubble dynamics

PACS: 47.55.dd, 47.55.df

DOI: 10.7498/aps.63.054707

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51275064, 50975036).

† Corresponding author. E-mail: hc Zhang@dlmu.edu.cn