

# 圆形破口附近气泡动态特性实验研究\*

王诗平 张阿漫<sup>†</sup> 刘云龙 吴超

(哈尔滨工程大学船舶工程学院, 哈尔滨 150001)

(2012年9月19日收到; 2012年10月11日收到修改稿)

以往对于壁面附近气泡动态特性的研究均是针对完整壁面进行的, 而对带破口壁面附近气泡运动特性的研究很少, 例如舰船结构在遭受药包爆炸冲击波作用后形成破口, 其仍可能会遭受随后生成气泡的二次打击, 破口的存在必定会影响爆炸生成气泡的动力学行为. 本文采用电火花气泡生成与观察实验装置, 对带有破口的壁面附近气泡脉动和射流特性进行研究. 通过实验发现, 当气泡在破口同心位置生成时, 破口的存在会使气泡靠近破口一侧形成“腔吸现象”, 并使气泡形成对射流. 在此基础上分析了破口大小和无量纲距离对破口附近气泡的影响规律, 最后讨论气泡在破口偏心位置生成时的运动特性, 结果发现破口附近气泡的二次打击威力随偏心距离的增加而增加, 文章旨在为不同边界附近气泡运动规律研究提供参考.

**关键词:** 气泡, 实验, 破口, 射流

**PACS:** 47.55.dd, 47.52.+j

**DOI:** 10.7498/aps.62.064703

## 1 引言

水下攻击武器是舰船生命力的主要威胁, 水下武器爆炸产生强大的冲击波, 尤其是当药包距离结构较近时, 药包爆炸产生的巨大气泡也会对船体造成严重破坏<sup>[1]</sup>. 一方面, 气泡脉动过程在最小体积附近辐射出较大的气泡脉动压力; 另一方面, 距离水中结构物较近时, 在结构 Bjerknes 效应的作用下, 靠近壁面的气泡在其收缩阶段被结构表面强烈地吸引, 远离壁面的一侧气泡加速收缩并向气泡内部凹陷, 产生指向结构的高速射流, 并穿透气泡, 冲击壁面<sup>[2-4]</sup>. 这种射流冲击作用, 冲击压力幅值与脉宽均较大, 能对水中结构物产生严重的局部损伤<sup>[5,6]</sup>. 真实水下爆炸气泡运动拍摄不仅耗资巨大, 而且气泡运动现象不易捕捉, 因此缩比实验仍是最直接有效的研究方法. 以往研究者采用缩比水下爆炸气泡实验<sup>[5,7]</sup> 研究水下爆炸气泡动态特性, 得到了很多重要的结论, 但由于安全性差, 操作困难, 且水质不利于对气泡形态的观察. 发展出激光<sup>[8,9]</sup> 和电火花<sup>[6,10-14]</sup> 在水槽中产生气泡来取代水下爆炸气

泡的实验方法, 而电火花实验装置简单可靠、操作性强等优点, 得到了广泛的应用.

以往对该问题的研究多是对完整壁面<sup>[5,8,10]</sup>, 但舰船由于冲击波损伤产生破口后, 破口位置仍有可能受到爆炸生成气泡的二次攻击, 而破口的存在改变了水下爆炸气泡的边界条件, 必定使得气泡的脉动和射流特性与完好壁面附近气泡的运动相比存在较大差异, 因此有必要对其进行深入的研究. 本文在前人研究成果的基础上, 基于电火花实验研究的方法, 采用低压放电配合高速摄影实验装置, 重点考查单个气泡在圆形破口附近(同心、偏心情况下)的脉动和射流特性, 分析壁面上存在破口的情形对气泡的脉动过程和射流特性造成的影响, 以及该影响与破口无量纲半径和无量纲距离的相互关系.

## 2 工况设置

实验在  $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$  的水箱内进行. 由可调式低电压打火装置产生  $200\text{ V}$  左右的瞬时脉冲, 通过连接在电极上的铜丝放电, 放电瞬间电能

\* 国家自然科学基金优秀青年科学基金(批准号: 51222904)、国家自然科学基金(批准号: 11202057, 50939002)、中国博士后科学基金面上项目(批准号: 2012M520709)和教育部新世纪人才支持计划(批准号: N CET-10-0054)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: amanzhang@gmail.com

转化为内能放出大量的热将铜丝瞬间熔断,周围水气化产生气泡.同时,启动高速摄影装置捕捉气泡形态,具体的实验装置设置参见文献[6].实验中的壁面为0.5 mm厚的钢板,中心钻出圆孔破口,破口半径分别为2,3,4,5和11 mm.采用200 V电压生成电火花气泡最大半径 $R_m$ 为12 mm+1.5 mm.破口刚性壁面为惟一边界条件.钢板竖直固定于水中,气泡中心的初始位置同破口圆心水平,如图1所示.

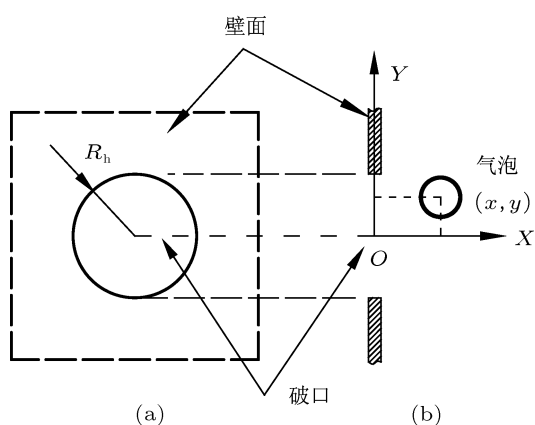


图1 破口示意图 (a) 正视图; (b) 侧视图

建立如图1所示的坐标系,坐标系原点位于破口中心位置,沿板所在平面的垂直方向为 $X$ 方向, $Y$ 方向与 $OX$ 所在水平面方向垂直, $(x, y)$ 为气泡中心在该坐标系下的坐标, $R_h$ 表示破口半径.为了使实验研究具有普遍性,采用气泡最大半径 $R_m$ 将破口半径 $R_h$ 和气泡中心位置 $(x, y)$ 无量纲化,如下式所

示:

$$\gamma_h = \frac{R_h}{R_m}, \tag{1}$$

$$\gamma_x = \frac{x}{R_m}, \tag{2}$$

$$\gamma_y = \frac{y}{R_m}, \tag{3}$$

式中, $\gamma_h$ 表示无量纲破口半径; $\gamma_x$ 和 $\gamma_y$ 表示气泡到壁面初始无量纲位置.

按照图1所示的实验布置,针对与破口同心的实验工况,分别选择在相同破口半径 $\gamma_h$ 和不同横坐标 $\gamma_x$ ,以及相同横坐标 $\gamma_x$ 和不同破口半径 $\gamma_h$ 的工况中进行实验,针对与破口偏心的实验工况,在相同 $\gamma_h$ 和 $\gamma_x$ 下,对不同偏心位置 $\gamma_y$ 进行实验,选取典型工况进行实验结果分析.

### 3 破口附近气泡实验

#### 3.1 破口附近同心气泡运动特性随距离变化规律

本次实验过程中200 V电压下的电火花气泡最大半径为12 mm+1.5 mm.本节中板的破口半径 $R_h = 4$  mm,选取典型工况考察并分析气泡在破口无量纲半径 $\gamma_h = 0.33$ 附近不同爆距下的实验现象及规律.各工况 $(\gamma_x, \gamma_y)$ 如表1所示.

表1 气泡爆距变化工况汇总表

工况	1	2	3
$(\gamma_x, \gamma_y)$	(0.07, 0)	(0.59, 0)	(1.10, 0)

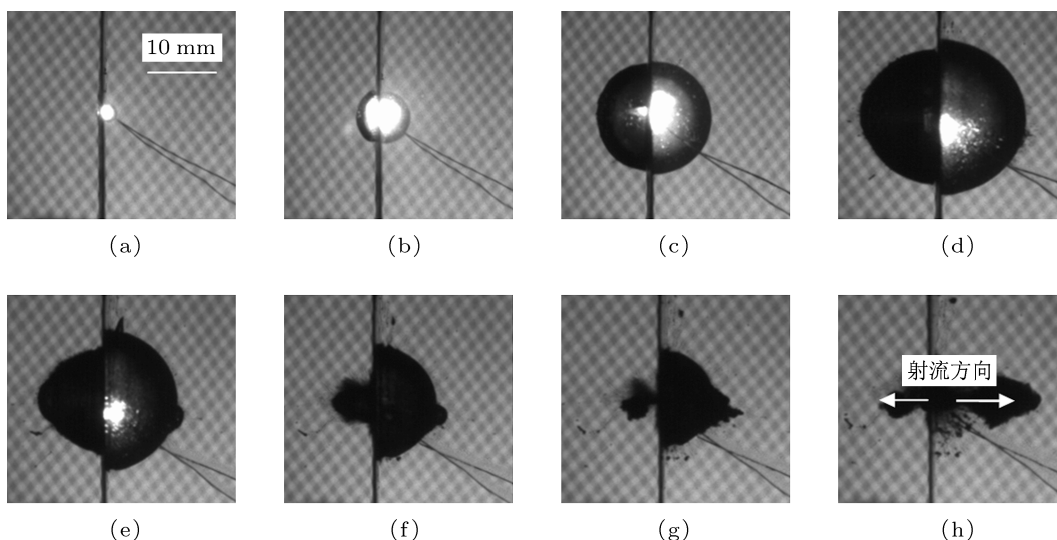


图2 气泡无量纲中心位于(0.07, 0)时破口附近气泡脉动过程 (a)  $t = 0.10$  ms; (b)  $t = 0.30$  ms; (c)  $t = 1.00$  ms; (d)  $t = 2.25$  ms; (e)  $t = 3.10$  ms; (f)  $t = 3.65$  ms; (g)  $t = 4.00$  ms; (h)  $t = 4.50$  ms

在图 2 中, 气泡的初始无量纲坐标为 (0.07, 0). 在初始膨胀阶段气泡跨过破口, 在壁面两侧同步发展, 当气泡尺寸超过破口时, 壁面左侧部分膨胀速度放慢, 滞后于右侧气泡的主要部分. 在  $t = 2.25$  ms 时气泡膨胀至最大体积, 气泡以竖直壁面为界两侧呈半球形, 左侧小, 右侧大. 随后气泡开始坍塌, 左侧部分气泡收缩速度明显快于右侧, 如  $t = 3.10$  ms 所示. 在气泡坍塌的最后阶段, 破口两侧气泡在壁面处分裂为左小右大的两个子气泡. 与无破口刚性壁面附近气泡形成朝向壁面方向射流相反, 带破口板会诱导气泡形成以向右方向为主的方向相反的

射流.

图 3 中气泡的初始无量纲位置为 (0.59, 0), 由于气泡到破口距离较近, 与图 2 相似, 在气泡膨胀阶段, 气泡会穿过破口而膨胀, 如  $t = 1.25$  ms 所示, 气泡在  $t = 2.25$  ms 时刻分裂为两个子气泡, 随后形成的射流方向与壁面方向相反, 射流宽度大约为 4 mm, 如图 3(e) 所示, 这股射流穿透气泡右侧, 而后其整体坍塌, 射流大部分穿过破口, 与完整壁面气泡射流完全作用在壁面的情况相比, 气泡对已生成破口的二次打击能力大大削弱.

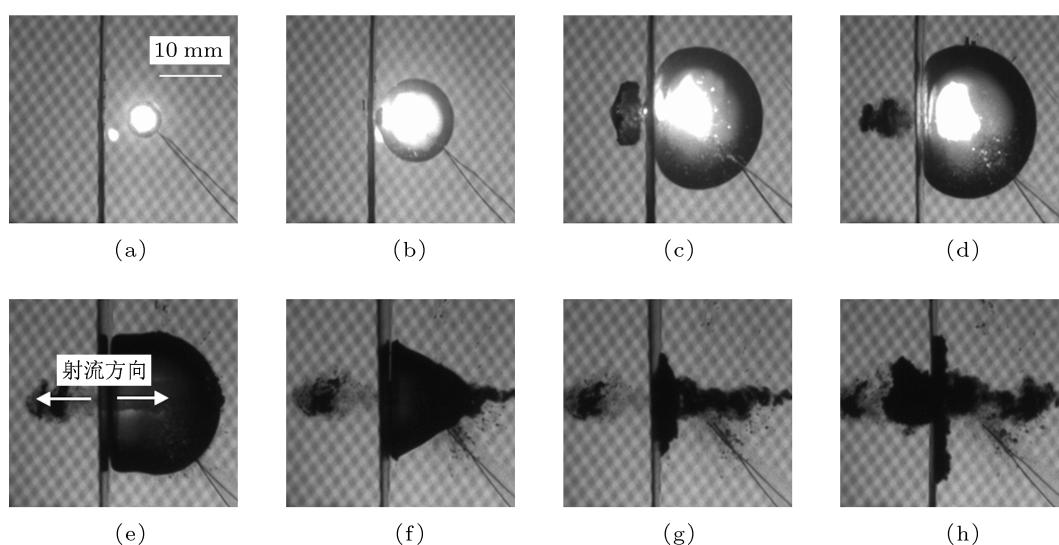


图 3 气泡无量纲中心位于 (0.59, 0) 时破口附近气泡脉动过程 (a)  $t = 0.15$  ms; (b)  $t = 0.50$  ms; (c)  $t = 1.25$  ms; (d)  $t = 2.25$  ms; (e)  $t = 3.25$  ms; (f)  $t = 4.05$  ms; (g)  $t = 4.35$  ms; (h)  $t = 5.00$  ms

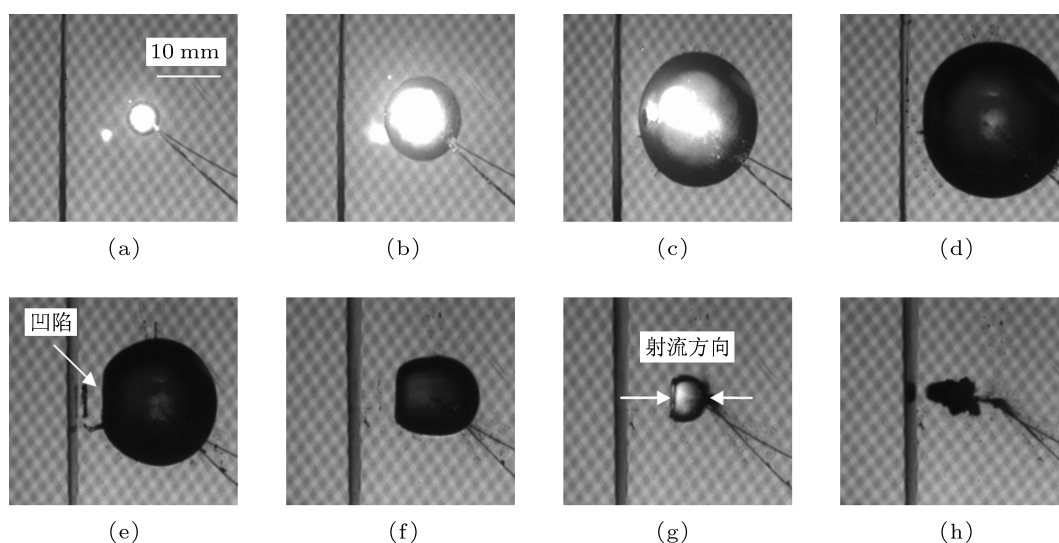


图 4 气泡无量纲中心位于 (1.10, 0) 时破口附近气泡脉动过程 (a)  $t = 0.15$  ms; (b)  $t = 0.50$  ms; (c)  $t = 1.15$  ms; (d)  $t = 2.10$  ms; (e)  $t = 2.85$  ms; (f)  $t = 3.20$  ms; (g)  $t = 3.35$  ms; (h)  $t = 3.45$  ms

在图 4 中, 气泡的初始无量纲位置为 (1.10, 0), 在气泡膨胀到最大体积附近, 破口对气泡的影响较小. 而在气泡坍塌过程中, 由于破口的存在, 使气泡产生与壁面相反的射流, 导致气泡靠近壁面一侧产生凹陷, 这种特征一直保持. 气泡朝向壁面方向的射流形成于其坍塌至最小体积之后, 如图 4(h) 所示, 这股射流在坍塌亦是穿过破口, 气泡的二次打击能力进一步被削弱.

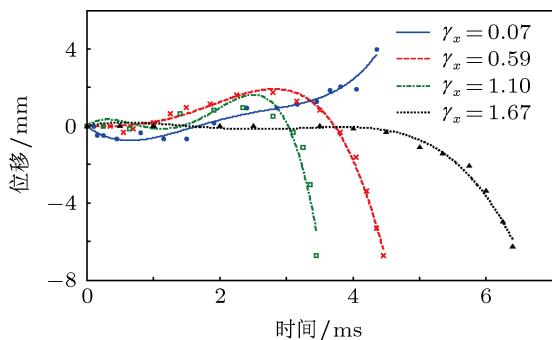


图 5 不同无量纲初始位置下破口附近气泡中心位移曲线

与破口同心工况下, 不同无量纲距离时气泡中心水平偏移随时间变化曲线如图 5 所示.

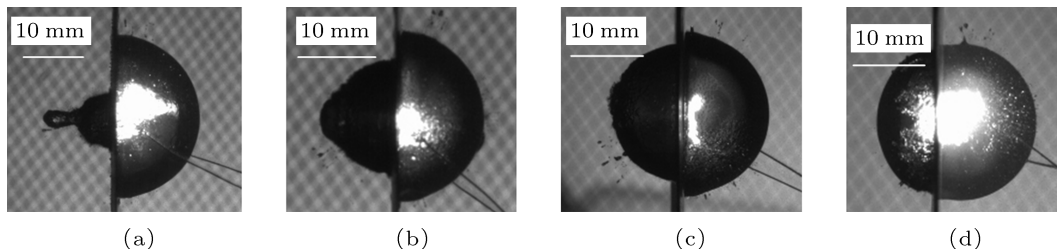


图 6  $\gamma_x = 0.09$  时不同尺寸破口处气泡最大半径时刻对比图 (a)  $\gamma_h = 0.17$ ; (b)  $\gamma_h = 0.27$ ; (c)  $\gamma_h = 0.42$ ; (d)  $\gamma_h = 0.92$

对于不同尺寸破口的实验中, 同一破口附近的气泡随爆距由近及远的变化, 脉动过程和射流特性都有着同前节所描述的相同的变化历程, 即膨胀过程中穿透破口气泡比重逐渐减小、先后产生向右和向左的对射流——只产生向左射流的过程. 针对破口附近气泡运动时形成对射流的特殊现象, 本文提取了不同破口实验中产生对射流的最小无量纲爆距, 并绘制曲线如图 7.

图 7 中可见,  $\gamma_x$  值均随着  $\gamma_h$  的增大而递增, 说明破口尺寸越大, 破口对于初始中心与其在同一水平面上气泡的影响距离就越远. 将所得数据点进行多项式拟合, 得到气泡在破口同心附近运动时, 气泡形成对射流最小  $\gamma_x$  与破口半径  $\gamma_h$  之间满足如下

由图 5 可知, 在气泡与破口同心时, 当  $\gamma_x = 0.07$  时由于气泡中心位移由破口主导, 膨胀阶段被破口所吸引, 收缩阶段被破口排斥; 随着  $\gamma_x$  的增大, 在膨胀阶段被壁面轻微的排斥, 而在收缩阶段被强烈地吸引,  $\gamma_x$  越大, 且气泡的迁移运动越平缓.

### 3.2 破口附近同心气泡运动特性随破口半径变化规律

在气泡与破口同心条件下, 当破口半径不同时, 气泡的运动特征也不相同, 因此, 本部分讨论在无量纲初始距离  $\gamma_x = 0.09$  条件下, 不同破口半径对气泡坍塌的影响.

图 6 中从左至右破口半径  $\gamma_h$  依次增大. 气泡均在 200 V 电压下生成, 破口半径别  $\gamma_h$  为 0.17, 0.25, 0.42 和 0.92. 对比发现, 破口半径越小, 对于膨胀阶段的气泡穿透破口的限制作用就越大, 如图 6 (a) 中壁面左侧气泡尚未发展成熟便在右侧主体气泡的带动下快速收缩; 图 6 (b) 和图 6 (c) 中, 左右两侧气泡尺寸分界明显; 而图 6 (d) 中左右两侧的气泡在纵向尺寸上相差甚小.

关系:

$$\gamma_x = -0.4736\gamma_h^2 + 0.9762\gamma_h + 0.4264. \quad (4)$$

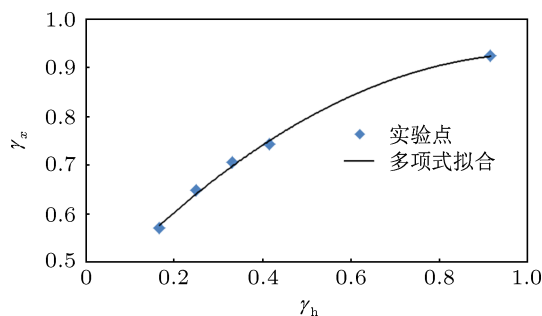


图 7 不同破口半径附近对射流最小  $\gamma_x$  曲线

### 3.3 破口附近偏心气泡的运动特性随偏心位置 $\gamma_y$ 的变化规律

上面讨论的是比较特殊的情况, 即气泡在破口同心位置生成. 然而气泡在破口非同心位置 (偏心) 生成更为普遍, 本小节讨论破口附近偏心气泡的运动. 本部分主要讨论破口半径  $\gamma_h = 0.42$  时, 相同  $\gamma_x$ , 不同  $\gamma_y$  时气泡的运动特性.

图 8 表示  $\gamma_h = 0.42$ ,  $\gamma_x \approx 0.45$  时气泡运动特性随  $\gamma_y$  的变化, 从左到右分别表示气泡的运动特性随不同气泡中心位置  $(\gamma_x, \gamma_y)$  的变化, 从上到下分别表示气泡脉动过程膨胀到最大体积、坍塌、射流的不同阶段. 从左到右气泡中心位置  $(\gamma_x, \gamma_y)$  分别为  $(0.46, 0)$ ,  $(0.46, 0.23)$ ,  $(0.44, 0.33)$ ,  $(0.43, 0.46)$ ,  $(0.43,$

$0.78)$ , 图中虚线为破口的中心位置. 从图 8(a) 可以看到, 随着偏心位置  $\gamma_y$  的增加, 气泡运动过程中的不对称性越来越明显, 其下部穿越破口到达破口另一侧的部分也越来越少. 边界条件的不对称性导致气泡坍塌过程中形成的射流向右下方偏斜, 且偏斜的角度随着  $\gamma_y$  的增加而增加, 如图 8(b) 箭头所示. 图 8(b) 第一幅图中用细实线描出了高速摄影拍摄的当前时刻射流形状. 在坍塌的最后状态, 如图 8(c) 所示, 气泡在破口偏心位置生成时, 气泡射流指向破口的上沿, 当  $\gamma_y$  较大时 ( $\gamma_y \geq 0.78$ ), 这股射流则完全作用在壁面上. 因此, 由上述分析可知, 水下爆炸气泡对结构的二次攻击威力随  $\gamma_y$  的增加而增加, 即破口对气泡二次攻击的削弱作用降低, 越来越接近气泡对完整刚性壁面的打击效果.

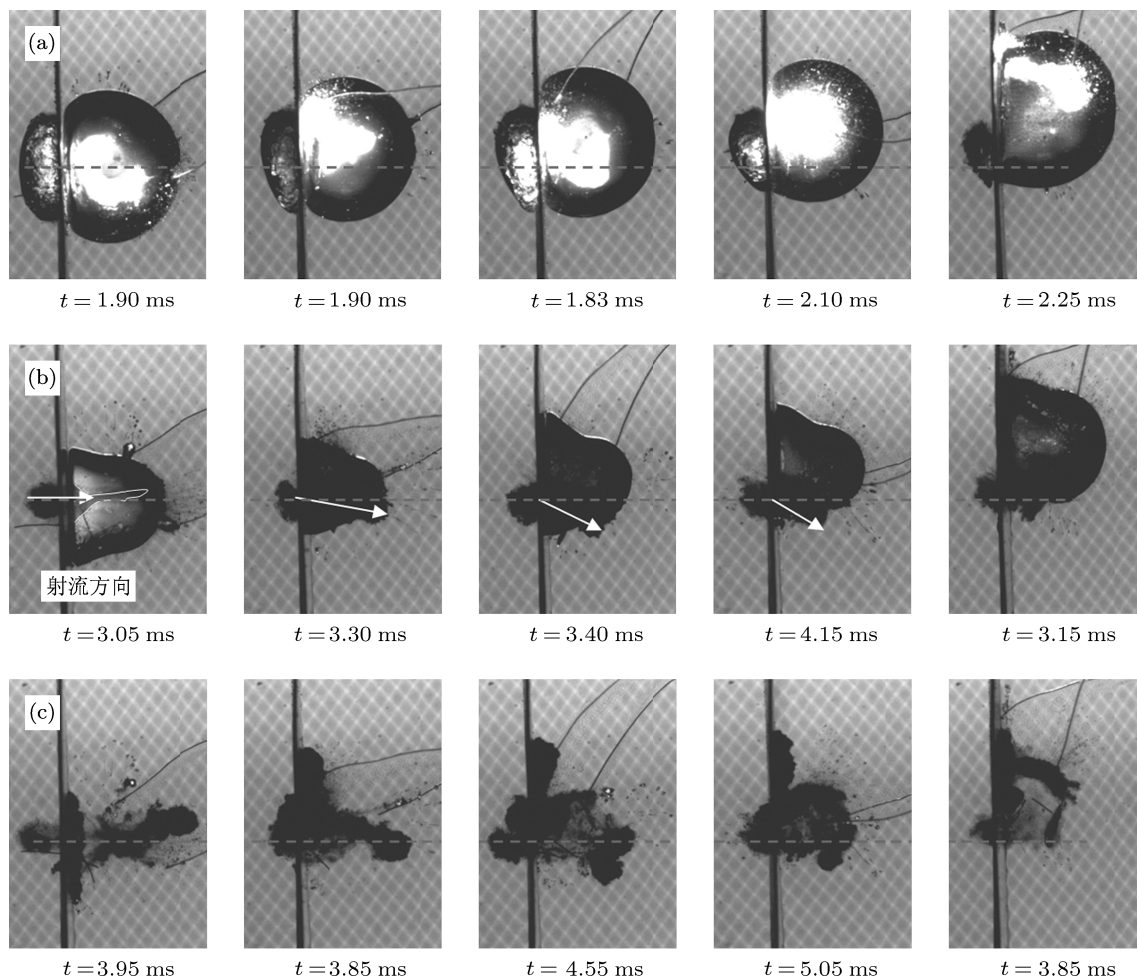


图 8  $\gamma_h = 0.42$ ,  $\gamma_x \approx 0.45$ ,  $\gamma_y$  分别为 0, 0.23, 0.33, 0.46 和 0.78 时气泡的运动

图 9 表示  $\gamma_h = 0.42$ ,  $\gamma_x \approx 0.85$  时气泡运动特性随  $\gamma_y$  的变化, 图片的排列规则与图 8 相同. 从左到右气泡中心位置  $(\gamma_x, \gamma_y)$  分别为  $(0.83, 0)$ ,  $(0.86,$

$0.23)$ ,  $(0.87, 0.48)$  和  $(0.83, 0.76)$ . 与图 8 结果相似, 由于边界条件不对称性, 气泡膨胀到最大体积和坍塌射流过程中, 不对称性随  $\gamma_y$  的增加而越来越

明显,如图 9(a) 中气泡穿透壁面部分越来越少. 图 9(b) 与图 8(b) 对比发现,图 9(b) 中气泡内部产生朝向右上方的凹陷,且角度随  $\gamma_r$  的增加而增加,在气泡射流阶段,与图 8(c) 相似,气泡在破口偏心位

置生成时,气泡射流指向破口的上沿,当  $\gamma_r$  较大时 ( $\gamma_r \geq 0.76$ ),这股射流完全作用在壁面上,如图 9(c) 所示.

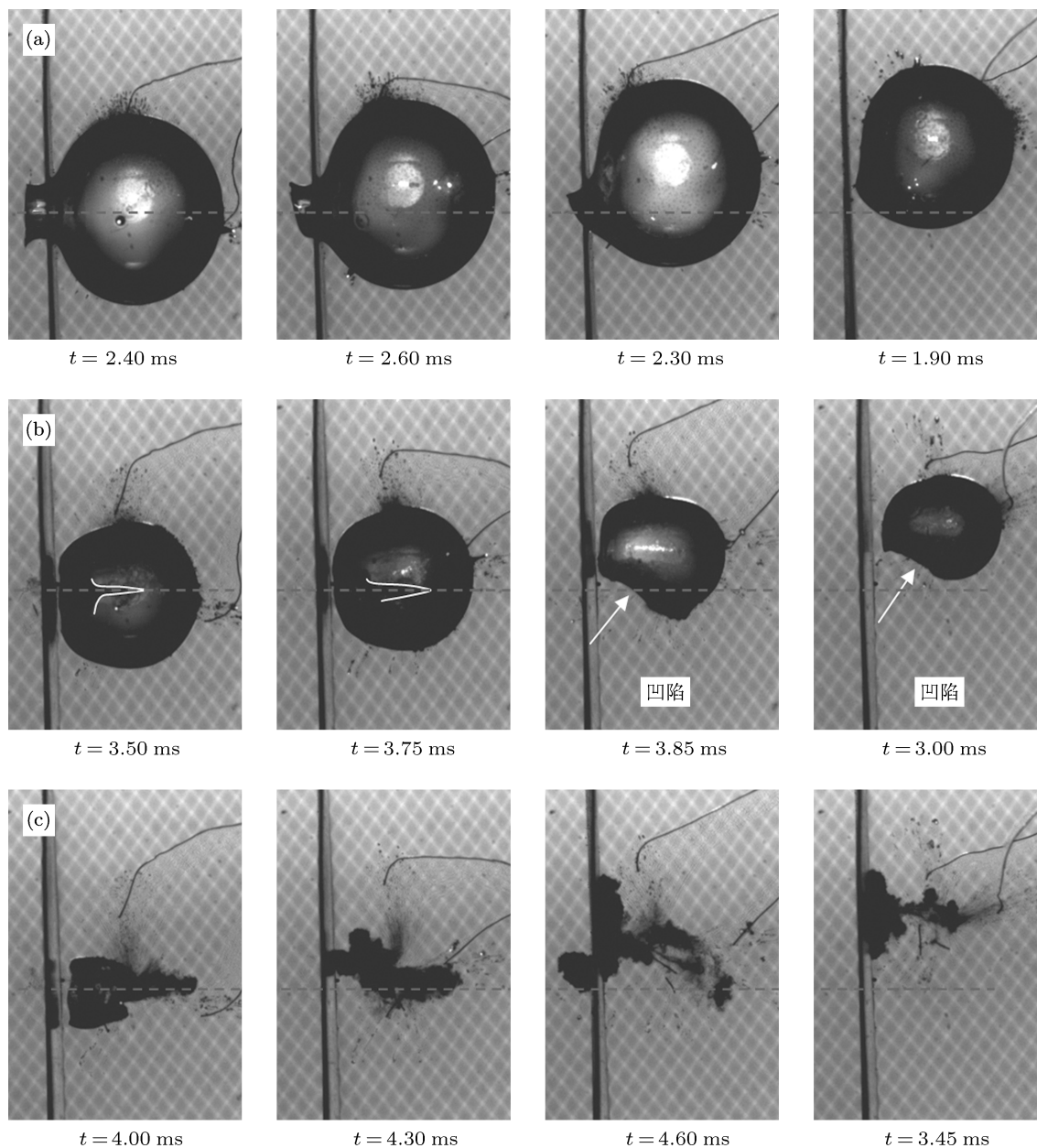


图 9  $\gamma_b = 0.42$ ,  $\gamma_s \approx 0.45$ ,  $\gamma_r$  分别为 0, 0.23, 0.48 和 0.76 时气泡的运动

## 4 结论

本文采用电火花气泡生成与观察实验装置,研究了平板破口附近气泡的动态特性,发现破口的存在会明显改变气泡的运动.通过对实验结果的分析得出如下结论:

1) 当气泡与破口位置同心时,破口的存在对附

近气泡运动的影响与壁面相反,破口的“腔吸效应”会使气泡在坍塌过程中产生凹陷;同时诱导气泡产生背向破口的射流,同壁面诱导射流一起形成对射流现象;

2) 当气泡与破口位置同心时,破口的存在会削弱壁面对气泡的抑制作用,破口尺寸越大,壁面对气泡的抑制作用越小,但破口的影响范围也越大;

3) 当气泡与破口位置偏心时, 在破口半径和横向坐标一定的情况下, 破口附近气泡的二次毁伤威力随偏心位置的增加而增加, 即随着气泡远离破口,

破口对其影响减小, 接近气泡对完整壁面的打击效果.

- [1] Cole R H (Translated by Luo Y J, Han R Z, Guan X) 1965 *Underwater Explosion* (Beijing: National Defence Industrial Press) (in Chinese) [库尔 R H 著, 罗耀杰, 韩润泽, 官信译 1965 水下爆炸 (北京: 国防工业出版社)]
- [2] Zhang Y L, Yeo K S, Khoo B C, Wang C 2001 *J. Comput. Phys.* **166** 336
- [3] Wang Q X 2004 *Phys. Fluids* **16** 1610
- [4] Zhang A M, Yao X L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1662 (in Chinese) [张阿漫, 姚熊亮 2008 物理学报 **57** 1662]
- [5] Klaseboer E, Hung K C, Wang C, Wang C W, Khoo B C, Boyce P, Debono S, Charlier H 2005 *J. Fluid Mech.* **537** 387
- [6] Zhang A M, Wang S P, Bai Z H, Huang C 2011 *Chin. J. Theor. Appl. Mech.* **43** 71 (in Chinese) [张阿漫, 王诗平, 白兆宏, 黄超 2011 力学学报 **43** 71]
- [7] Wang B, Zhang Y P, Wang Y P 2009 *Chin. J. High Press. Phys.* **23** 332 (in Chinese) [汪斌, 张远平, 王彦平 2009 高压物理学报 **23** 332]
- [8] Brujan E K, Hahen K, Schmit P 2001 *J. Fluid Mech.* **433** 283
- [9] Akhatov I, Vakhitova N, Topolnikov A, Zakirov K, Wolfrum B, Lindau T K O, Mettin R, Lauterborn W 2002 *Exp. Therm. Fluid Sci.* **26** 731
- [10] Black J R, Gibsion D C 1987 *Ann. Rev. Fluid Mech.* **19** 99
- [11] Zhang A M, Wang C, Wang S P, Cheng X D 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 084701 (in Chinese) [张阿漫, 王超, 王诗平, 程晓达 2012 物理学报 **61** 084701]
- [12] Buogo S, Plocek J, Vokurka K 2009 *Acta Acust. Uni. Acus.* **95** 46
- [13] Gao B, Zhang H H, Zhang C 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1714 (in Chinese) [高波, 张寒虹, 张弛 2003 物理学报 **52** 1714]
- [14] Lu X P, Pan Y, Zhang H H 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1768 (in Chinese) [卢新培, 潘垣, 张寒虹 2002 物理学报 **51** 1768]

## Experimental research on bubble dynamics near circular hole of plate\*

Wang Shi-Ping Zhang A-Man<sup>†</sup> Liu Yun-Long Wu Chao

(College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

(Received 19 September 2012; revised manuscript received 11 October 2012)

### Abstract

Traditional studies on bubble dynamics near solid boundaries mainly focus on its pulsation and jet features near a full plate. A hole will be formed when a warship is attacked by an underwater weapon and it may be subjected to a subsequent attack generated by charge explosion. And the hole on the plate would affect the blow effect of the underwater explosion bubble nearby. To study the bubble pulsation and jet features near a plate with a hole in the middle, a series of experiments is carried out using a spark bubble generator and high-speed camera. We find that when a bubble is generated homocentricly near the hole, cavity-attraction effect of the bubble will be formed due to the effect of the hole, and the opposite-jets can then be formed. Then the influences of dimensionless standoff distance and hole size are analyzed. Finally, the dynamic behavior of a bubble which is generated decenteredly near the hole is studied to show that the blow effect of a bubble increases with decentered position increasing.

**Keywords:** bubble, experiment, hole, jet

**PACS:** 47.55.dd, 47.52.+j

**DOI:** 10.7498/aps.62.064703

\* Project supported by the Outstanding Youth Fund National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51222904), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11202057, 50939002), the General Financial Grant of the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2012M520709) and the Program for New Century Excellent Talents in University, China (Grant No. NCET-10-0054).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: amanzhang@gmail.com