

# 爆炸气泡与自由水面相互作用动力学研究<sup>\*</sup>

王树山 李梅<sup>†</sup> 马峰

(北京理工大学, 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

(2014年3月25日收到; 2014年4月25日收到修改稿)

为探究爆炸水幕形态与水下流场变化之间的联系, 设计了小当量RDX装药水箱内爆炸实验系统. 采用两台高速录像机同步拍摄了气泡和水幕形态的演变过程, 获得了三种典型气泡形态和六种典型水幕形态. 通过观察气泡-水面-空气之间的流场变化和理论分析, 揭示了六种形态水幕的演变规律及其形成机理, 并与电火花形成气泡实验结果进行了对比分析. 通过对不同比例深度条件下的气泡横向半径、纵向半径、膨胀时间、脉动周期、气泡边界运动过程等的统计分析, 揭示了近水面水下爆炸形成气泡的动力学过程.

**关键词:** 水下爆炸, 水幕, 气泡, 实验

**PACS:** 47.55.dr, 47.55.dd, 47.54.De

**DOI:** 10.7498/aps.63.194703

## 1 引言

近水面水下爆炸时, 气泡在膨胀、收缩、坍塌、上浮等一系列运动过程中, 将与自由水面发生强烈的耦合作用, 使得水面出现各种形态的水幕现象, 包括水冢、水柱、水射流等<sup>[1-3]</sup>. 这种复杂物理现象在船舶、水中兵器等国防领域得到了深切的关注<sup>[4]</sup>. 国内外诸多学者对此开展了研究, 主要是围绕单气泡<sup>[5]</sup>/气泡群<sup>[6]</sup>在自由边界<sup>[7]</sup>/固壁边界<sup>[8]</sup>/弹性边界附近的运动特性展开了理论分析、数值模拟<sup>[9-11]</sup>和实验研究<sup>[12-14]</sup>, 重点研究气泡的运动、变形、Bjerknes射流、Buoyancy射流现象等, 绝大部分忽视了气泡近边界运动产生的后效作用(如边界运动、变形、破碎等复杂过程). 近年来, 水幕反导技术<sup>[15-18]</sup>成为了国内外各国海军探索的热点, 其中爆炸气泡与自由水面相互作用的动力学过程是研究的核心问题之一, 对武器系统设计、毁伤效能分析等具有指导性意义.

对爆炸气泡与自由水面相互作用过程的研究, 现主要采用的实验方法有水下爆炸实验和模拟气泡实验. 由于水下爆炸实验成本高、技术复杂(难

以捕捉到气泡与边界相互作用的过程)、且具有一定的危险性, 许多作者开始采用电火花形成空化气泡<sup>[19-21]</sup>、激光形成空化气泡<sup>[22-24]</sup>等方法代替爆炸气泡, 研究气泡与水面相互作用形成的水面现象. 然而, 爆炸气泡、空化气泡与边界相互作用过程虽然力学上具有相似性, 但物理本质上仍然存在重要差别. 电脉冲、激光脉冲作用下形成的气泡是瞬间高温将水汽化的过程, 气泡内部为可冷凝的水蒸气, 而爆炸气泡内部由中心爆轰产物气体和外围水蒸气组成. 装药起爆后, 爆轰产物气体具有热能和动能, 使得周围水汽化, 并不断推动气泡表面向外扩张运动. 爆轰产物气体处于爆炸气泡的中心位置, 而周围水蒸气直接与水相互作用. 因此, 当气泡不破裂时, 可采用电脉冲或电火花形成气泡代替爆炸气泡, 研究气泡与边界的相互作用过程. 而当气泡破裂时, 爆轰产物气体释放后将会扰乱整个流场, 爆轰产物气体的影响将不能被忽略. 因此, 开展爆炸水幕形成机理及其形态演变研究时, 爆炸气泡不能完全被空化气泡代替, 有必要开展水下爆炸实验. 本文设计了一套小当量装药近水面水下爆炸实验系统, 通过两台高速录像机同步拍摄了气泡和水幕的运动行为, 结合理论分析, 系统、全面的研究

<sup>\*</sup> 爆炸科学与技术国家重点实验室基金(批准号: YBKT09-07)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: pulmmay@bit.edu.cn

了爆炸气泡与自由水面相互作用的动力学过程.

## 2 实验原理与方案设计

如图 1 所示, 实验系统由敞口水箱、高速录像系统、起爆控制装置、光源和标杆等 6 部分组成.

设计敞口水箱时, 需综合考虑以下因素: 1) 不影响气泡形态. 敞口水箱尺寸越大, 刚性边界反射冲击波对气泡形态的影响越小. 2) 拍摄的气泡边界清晰. 水箱尺寸越小, 水越清澈、光线越强, 采光越多, 高速摄影拍摄的气泡越清晰. 3) 水箱抗爆, 安全性好. 水箱尺寸越小, 壁厚越薄, 冲击波对箱体的破坏力越大. 4) 水箱重量不宜过重, 便于安装和移动. 水箱尺寸越大, 壁厚越厚, 重量越大, 安装和移动越困难. 经过冲击波超压和刚体抗冲击性能计算, 考虑气泡形态不受影响、拍摄清晰度和箱体强度等综合因素, 水箱内壁尺寸确定为 1.2 m(长)  $\times$  1.2 m(宽)  $\times$  1.0 m(高). 长度约等于 0.6 g RDX 装药水下爆炸形成气泡最大半径的 4 倍, 敞口水箱由 8 mm 厚钢板焊接而成, 四壁开有观察窗, 观察窗为 32 mm 厚的防爆玻璃, 尺寸 500 mm  $\times$  700 mm. 水箱所有钢板的内壁黏贴 5 mm 厚的橡胶板, 用于吸收冲击波能.

高速录像系统由两台高速录像机、两台笔记本电脑和数据线组成, 用于同步拍摄气泡和水幕的运

动过程. 通过与起爆控制装置联动的开关启动高速录像机, 实现起爆、气泡拍摄和水幕拍摄的时间同步. 两台高速录像机的拍摄幅频均为 4000 m/s, 像素分别为  $512 \times 800$  和  $1024 \times 1008$ .

光源是备用装置, 仅在自然光线不足的情况下使用, 为高速录像机提供附加光线, 提高拍摄的清晰度. 所选光源必须具有直流、高光强等特点.

标杆高 3 m, 固定于水箱外壁, 用于标定水幕的高度.

装药量和起爆深度是影响实验结果的关键因素, 通常采用起爆深度  $d$  和气泡最大半径  $R_m$  的比值  $d/R_m$  (称为比例深度) 表征装药量和起爆深度的影响. 进行研究方案设计时, 为获得系统、全面的实验结果, 基于前期海上实验研究经验<sup>[25]</sup>, 选取了  $d/R_m < 1$  的 7 种条件,  $d/R_m = 0, 0.201, 0.301, 0.401, 0.502, 0.603, 0.804$  (对应起爆深度分别为 0 m, 0.03 m, 0.045 m, 0.06 m, 0.075 m, 0.09 m, 0.12 m), 和  $d/R_m > 1$  的 7 种条件,  $d/R_m = 1.007, 1.209, 1.412, 1.615, 1.819, 2.023, 2.227$  (对应起爆深度分别为 0.15 m, 0.18 m, 0.21 m, 0.24 m, 0.27 m, 0.30 m, 0.33 m). 所选的 14 种实验条件涵盖了水面爆炸和深水爆炸的极值情况, 以及起爆深度接近气泡最大半径的过渡情况, 部分实验条件进行了重复性实验, 保证了实验的系统性和全面性.

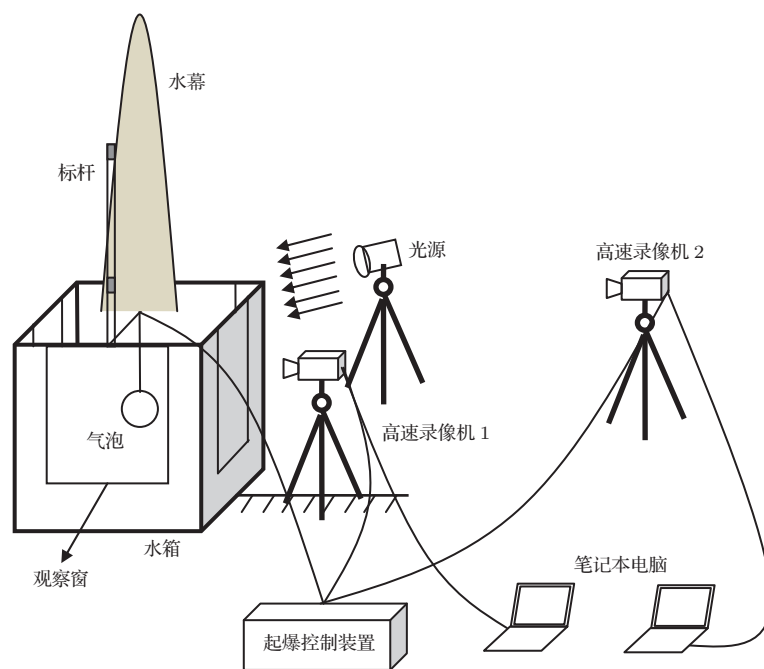


图1 实验系统组成与布置

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 典型水幕形态及其演变过程

观察高速录像结果,发现近水面水下爆炸后,水中出现冲击波和二次压力波闪光、气穴、球形气泡、卵形气泡、内凹形气泡等现象,水面上出现径向喷射水柱、垂直喷射水柱、顶端飞散水柱、水射流、水冢、二次水冢等6种水幕形态,水中和水面现象相互依存,并随起爆深度的增加、时间的推移而发生形态演变.根据气泡和水幕形态的演变过程,可将比例深度划分为4段范围,相应演变过程如下.

图2所示为径向喷射水柱和水射流两种形态水幕的演变过程及对应的水中气泡形态演变过程,这种现象产生于起爆点紧贴水面的实验情况,即 $d/R_m = 0$ 的实验条件.装药起爆后,冲击波和爆轰产物气体沿径向传播,水中形成上端开口的半球

形气泡,水面上水滴径向飞溅,形成径向喷射水柱(图2(a), (i));气泡内部与大气相通,爆轰产物气体向外界释放,同时向气泡内壁方向传递稀疏波,在稀疏波的作用下爆轰产物气体携带气泡内表壁水滴脱离、飞溅,并沿轴心方向汇聚,向外释放的爆轰产物气体带动飞溅的水滴向上运动,形成自气泡下表面向上成长的水射流(图2(b)—(d), (j)—(l));当 $t = 47.75 \text{ ms}$ 时,气泡膨胀到最大并开始收缩,气泡底端向上运动(图2(m)—(p)),气泡深度方向尺寸减小,但横向尺寸继续扩大,直至浮出水面.整个过程中水射流持续上升,直至在重力、空气阻力、风力等的作用下稀化、消失(图2(e)—(h)).显然,贴近水面水下爆炸形成水射流的形态和形成机理与电火花或激光形成气泡破裂后形成水射流的形态和机理不同(与张阿漫等<sup>[21]</sup>的电火花实验中 $d/R_m = 0.083$ 条件下的结果进行对比),具体表现

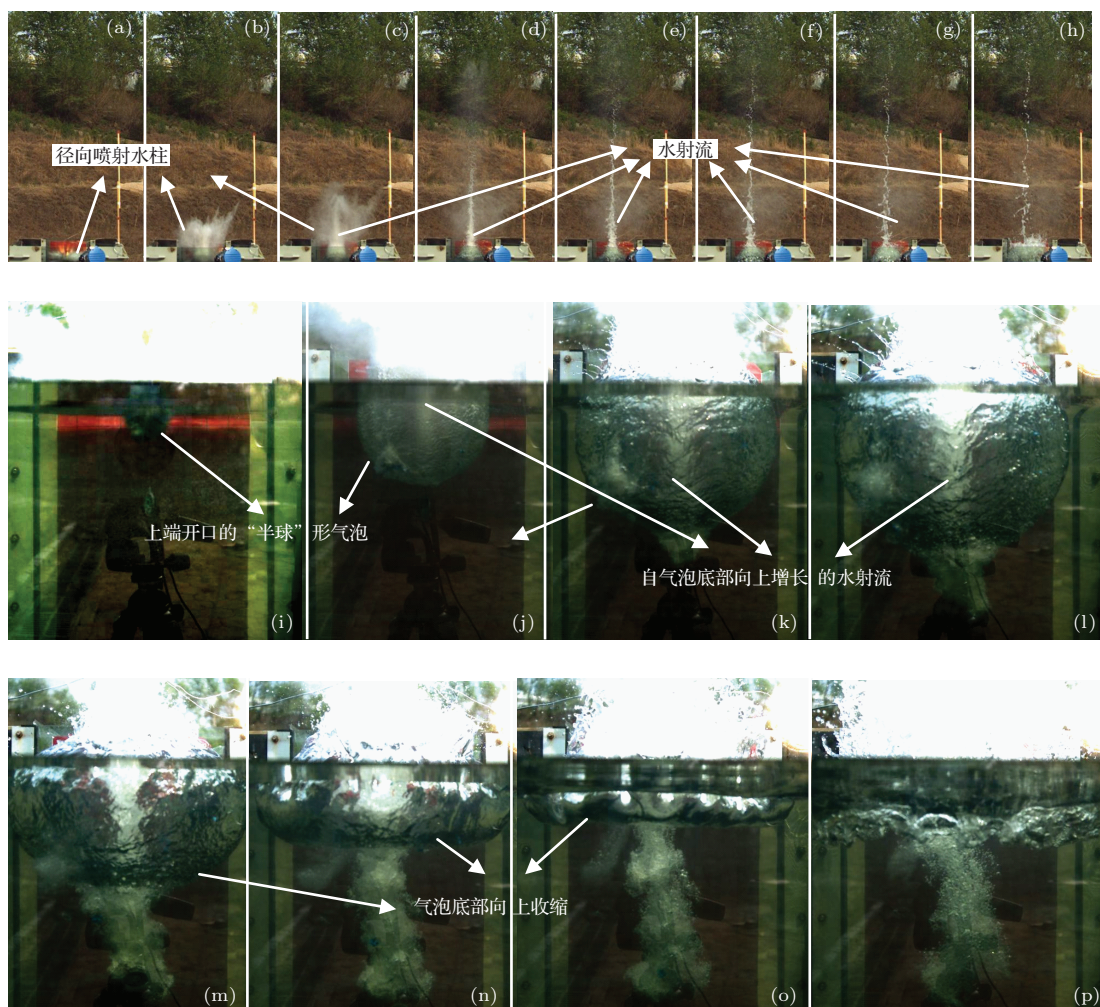


图2  $d = 0 \text{ m}$  时爆炸水幕和气泡的演变过程 (a)—(h) 为水幕形态演变过程, (i)—(p) 为气泡形态演变过程. (a), (i)  $t = 0.25 \text{ ms}$ ; (b), (j)  $t = 6.5 \text{ ms}$ ; (c), (k)  $t = 34 \text{ ms}$ ; (d), (l)  $t = 86.5 \text{ ms}$ ; (e), (m)  $t = 150 \text{ ms}$ ; (f), (n)  $t = 200 \text{ ms}$ ; (g), (o)  $t = 250 \text{ ms}$ ; (h), (p)  $t = 350 \text{ ms}$

在: 1) 水下爆炸形成水射流的高度约等于气泡直径的7—10倍, 而电火花实验形成水射流的高度约等于气泡直径的3—4倍. 2) 水下爆炸形成的水射流是爆轰产物气体带动下和稀疏波作用下, 气泡内表面水滴向上飞溅并在轴心方向汇聚的结果, 是自气泡底部向上增长的射流, 而电火花实验形成的水射流是水冢在重力作用下回落、聚拢并相互冲击形成的. 3) 水下爆炸形成的水射流能够稳定成长, 而电火花实验形成的水射流不能稳定成长.

图3所示为水冢、垂直喷射水柱和水射流三种形态水幕的演变过程, 这种现象产生于  $0.201 \leq d/R_m \leq 0.804$  的实验条件. 装药起爆后, 首先在水面附近观察到强烈的白色闪光(冲击波水面反射的结果), 水下球形气泡快速膨胀;  $t = 0.25$  ms时, 爆炸气泡与水面之间出现气穴(如图3(h)所示, 气穴由许多小气泡组成, 又称为空化

气泡层), 随着时间的增长气穴渐渐消退(总持续时间约1.5 ms), 随后球形气泡向卵形气泡演变, 水面形成水冢; 气泡上边界超出水面的原始位置并到达水面的新位置时, 气泡顶端破裂, 内部爆轰气体产物向外释放, 水面形成垂直喷射水柱(图3(d)); 气泡继续膨胀, 气泡内部自上而下传递强扰动(图3(i)—(k)); 当气泡膨胀到最大后, 气泡开始收缩, 气泡下边界位置几乎不变, 但上边界迅速下凹, 气泡与水面之间观察到爆轰产物气体向外释放的轨迹, 释放气体的总宽度减小, 垂直喷射水柱演变成了水射流形态(图3(d)—(f)); 气泡继续收缩, 爆轰气体产物从气泡下表面穿出, 并逐渐向水中释放爆轰气体产物, 气-水边界失稳(图3(l)—(n)), 气泡收缩过程变缓慢, 并且气泡不能进入第二次脉动过程, 而水射流高度逐渐增加, 直径逐渐减小.

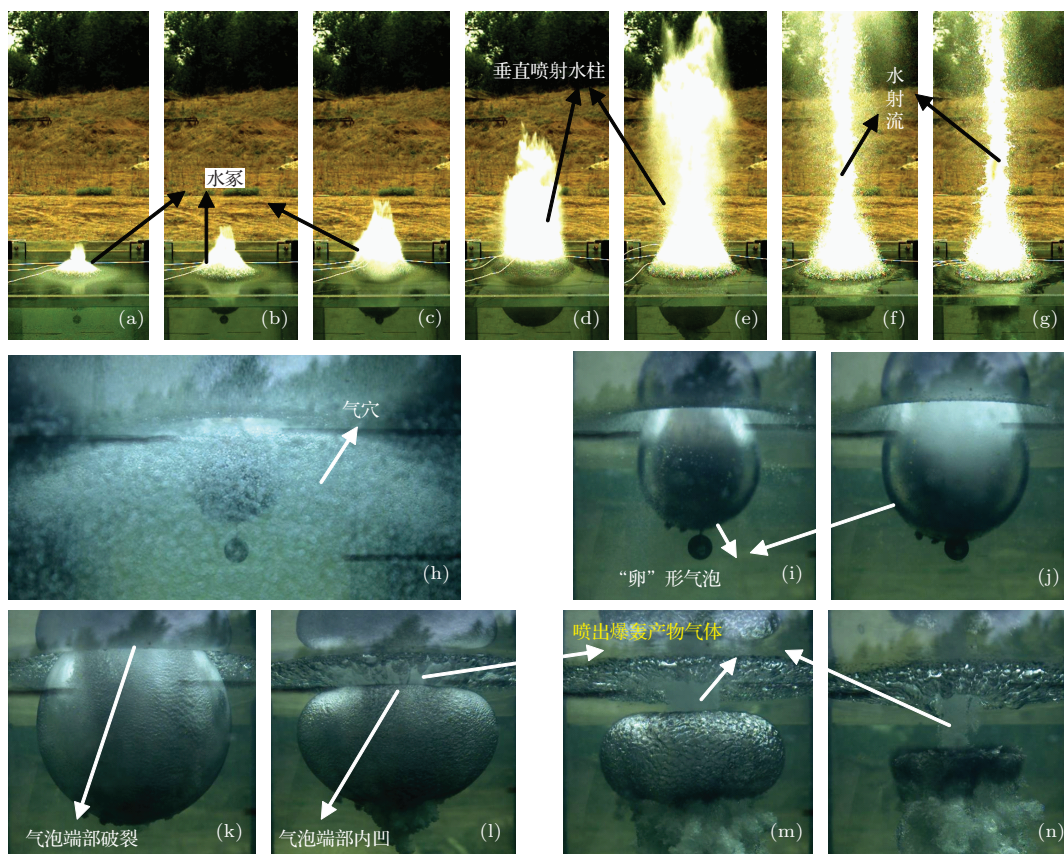


图3  $d = 0.06$  m时, 爆炸水幕和气泡的演变过程 (a)—(g) 为水幕形态演变过程, (h)—(m) 为气泡形态演变过程. (a), (h)  $t = 1$  ms; (b), (i)  $t = 1.75$  ms; (c), (j)  $t = 3$  ms; (d), (k)  $t = 7.5$  ms; (e), (l)  $t = 16$  ms; (f), (m)  $t = 35$  ms; (g), (n)  $t = 48$  ms

实验中, 当  $0.201 \leq d/R_m \leq 0.401$  时, 水冢现象不明显, 但垂直喷射水柱持续时间相对较长, 水射流高度和宽度等相对较大; 当  $0.502 \leq d/R_m \leq 0.603$  时, 水冢现象明显, 垂直喷射水柱现象持续时间相对较短, 水射流高度和宽度相对较小; 当

$d/R_m = 0.804$  时, 气泡破口尺寸很小, 向外释放的能量很低, 致使气泡收缩到最小时产生了二次压力波现象. 与电火花实验相比(如张阿漫电火花实验中,  $d/R_m = 0.58, 0.78$  条件下的实验结果<sup>[21]</sup>): 1) 爆炸气泡在水面破裂后及收缩过程中, 爆轰产物气

体的释放是形成垂直喷射水柱和水射流的本质原因, 而电火花形成的水柱是气泡收缩、水冢回落过程中水流相互冲击的作用结果; 2) 水下爆炸实验中的垂直喷射水柱和水射流产生于气泡膨胀阶段, 而电火花实验中水柱产生于气泡收缩过程; 3) 水下爆炸实验中, 爆轰产物气体的释放导致气泡内部能量降低, 使气泡提前进入收缩阶段, 而电火花实验中是由于气泡的收缩, 导致水柱现象的产生; 4) 水下爆炸实验中, 垂直喷射水柱和水射流都是爆轰产物气体和水的混合物, 而电火花实验中获得的水柱只含有水.

图4所示为水冢和顶端飞散水柱两种形态水幕的演变过程, 这种现象产生于  $1.007 \leq d/R_m \leq 1.412$  的实验条件. 装药起爆后, 首先在水下观察到白色闪光, 并存在一条白色迹线, 水面出现水滴向上飞溅的白色区域; 气泡呈球形快速膨胀, 观察窗内壁出现大量小气泡, 在爆炸形成的气泡与水面之间观察到气穴现象, 该区域上边界为先前观察到的白色迹线, 随着气泡的继续膨胀, 气穴逐渐消失, 向上飞溅的水滴呈水冢形态向上运动;  $t = 9$  ms

时, 气泡膨胀到最大, 气泡接近球形, 气泡上下直径略大于左右直径, 此时对应水面现象仍然为水冢形态; 气泡开始收缩, 气泡上边界扁平,  $t = 20.25$  ms时气泡收缩直至最小; 气泡第一次膨胀和收缩的过程中, 水面上水冢持续向上增长, 气泡收缩到最小瞬间产生的二次压力波在水面反射, 加快了水冢上升速度, 并在水冢上端面产生二次飞溅水滴(图4(d)–(f)); 气泡再次膨胀, 但气泡不再呈球形, 而是具有扁平的上边界, 而且气泡与水之间不再有光滑的界面(图4(o)); 气泡第二次膨胀到最大时, 气泡半径小于第一次最大半径; 气泡第二次收缩,  $t = 39.5$  ms时气泡收缩至最小(图4(p)); 随后, 气泡存在多次脉动, 均呈现混沌状态, 逐渐向下运动; 气泡第二次及其之后的脉动过程对水冢形态不再产生影响, 水冢高度继续增加, 随着时间的增长, 水冢在重力作用下回落, 形成了顶端飞散水柱形态的水幕(图4(f)–(i)). 与电火花实验相比(如张阿漫电火花实验中,  $d/R_m = 1.08$  条件下的实验结果<sup>[21]</sup>): 顶端飞散水柱是二次压力波水面反射和气

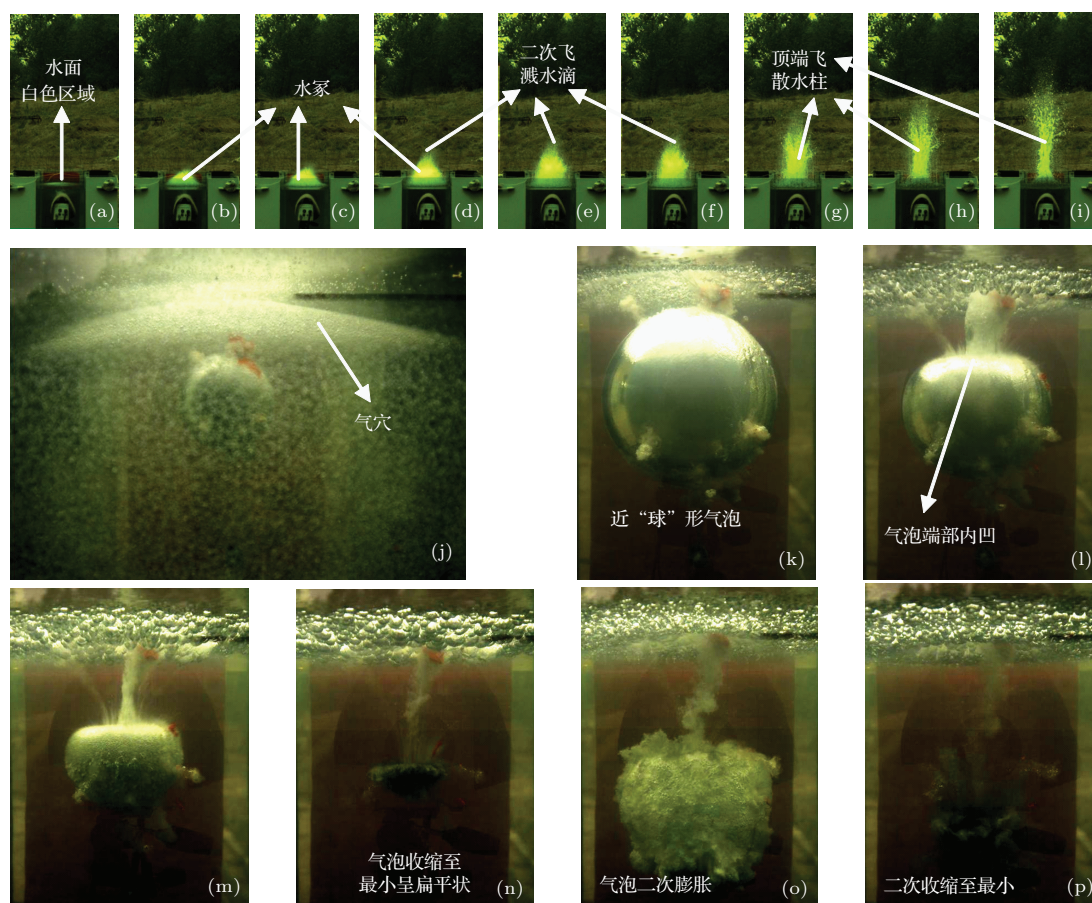


图4  $d = 0.15$  m时, 爆炸水幕和气泡的演变过程 (a)–(i) 为水幕形态演变过程, (j)–(p) 为气泡形态演变过程. (a), (j)  $t = 1.5$  ms; (b), (l)  $t = 16$  ms; (c), (n)  $t = 20.25$  ms; (d)  $t = 40$  ms; (e)  $t = 60$  ms; (f)  $t = 70$  ms; (g)  $t = 110$  ms; (h)  $t = 150$  ms; (i)  $t = 210$  ms; (k)  $t = 9$  ms; (m)  $t = 18.25$  ms; (o)  $t = 30$  ms; (p)  $t = 39.5$  ms

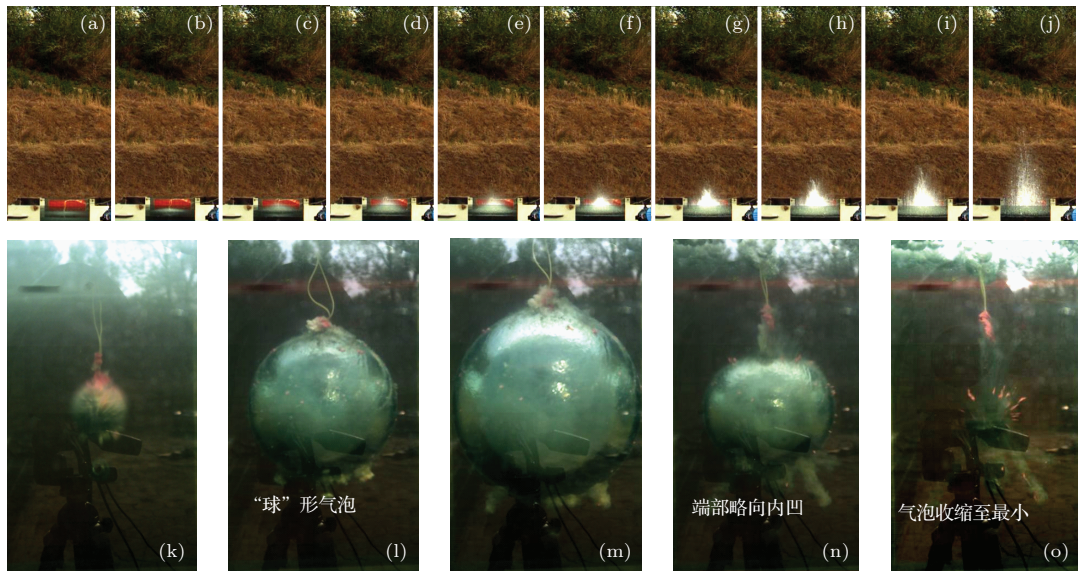


图5  $d = 0.24$  m时, 爆炸水幕和气泡的演变过程 (a)—(j) 为水幕形态演变过程, (k)—(o) 为气泡形态演变过程. (a), (k)  $t = 0.5$  ms; (b), (l)  $t = 4$  ms; (c), (m)  $t = 11$  ms; (d), (n)  $t = 20$  ms; (e), (o)  $t = 25.5$  ms; (f)  $t = 35$  ms; (g)  $t = 45$  ms; (h)  $t = 55$  ms; (i)  $t = 75$  ms; (j)  $t = 120$  ms

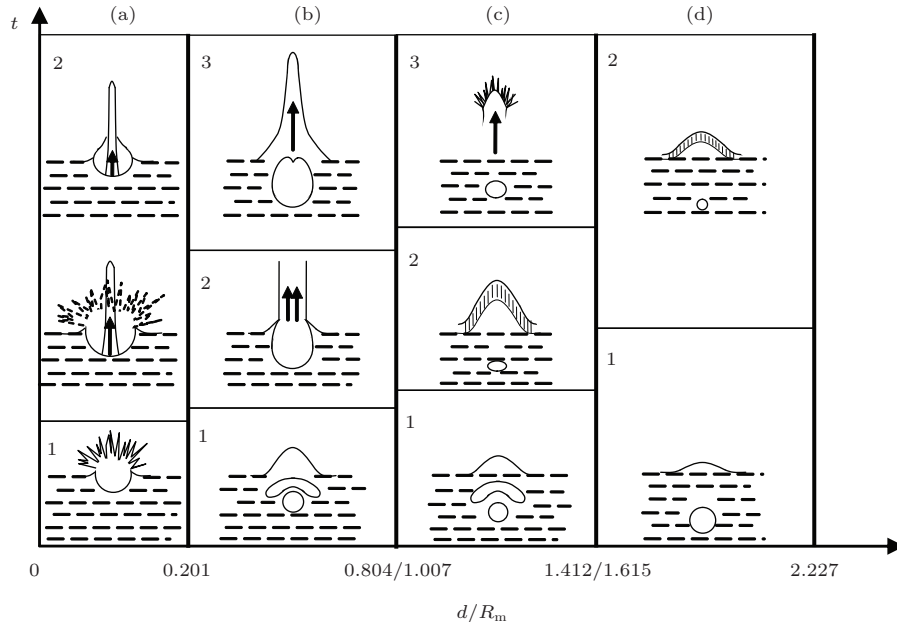


图6 气泡和水幕形态随比例深度和上升时间的演变过程 a1 为径向喷射水柱; a2, b3 为水射流; b2 为垂直喷射水柱; b1, c1, d1 为水冢; c2, d2 为二次水冢; c3 为顶端飞散水柱

泡收缩过程中水流相互冲击的作用结果, 而电火花实验中, 气泡收缩到最小时没有二次压力波产生, 只有水流相互冲击的作用, 因此两种实验方法下形成的水面现象有所不同.

图5所示为水冢和二次水冢的演变过程, 对应于  $1.615 \leq d/R_m \leq 2.227$  的实验条件. 装药起爆后, 在水面附近观察到白色闪光, 并存在一条白色迹线; 球形气泡快速膨胀, 观察窗内壁出现大量小气泡, 但没有气穴现象, 水面水滴向上飞溅, 形成水冢; 观察窗内壁的小气泡渐渐消退, 球形气泡逐渐

膨胀到最大; 气泡开始收缩, 气泡呈球形收缩至最小, 水下观察到二次压力波闪光, 水面出现二次水冢; 当  $d = 0.24$  m,  $0.27$  m时, 气泡收缩到最小时呈扁平形状, 当  $d = 0.3$  m,  $0.33$  m时, 气泡收缩到最小时仍然呈现球形, 气泡再次呈球形膨胀, 边界清晰; 气泡第二次膨胀到最大, 此时最大半径小于第一次膨胀的最大半径, 气泡第二次收缩直至最小; 随后, 气泡存在多次脉动过程. 与电火花实验结果相比 (如张阿漫电火花实验中,  $d/R_m = 2.63$  条件下的实验结果<sup>[21]</sup>): 1) 爆炸形成的水冢和二次水冢

为向上飞溅的离散水滴,是冲击波和二次压力波在水面反射的结果,而电火花实验中不存在离散飞溅水滴,而是在气泡膨胀运动的推动下形成的微鼓型水冢. 2) 由于两种实验在此段条件范围内气泡距离水面都比较远,气泡呈球形收缩过程中水流冲击作用减弱,都不能在水面形成柱状形态的水幕.

综上,气泡和水幕形态随比例深度和上升时间的变化过程如图6所示.

### 3.2 比例深度对气泡动力学参数影响

#### 3.2.1 气泡最大半径

通过测量,获得气泡 $x$ 轴方向最大半径 $R_{x\max}$ , $y$ 轴方向气泡中心与气泡下表面的距离 $R_{y\max\text{下}}$ ,及气泡中心与水面的距离 $h_{y\max\text{上}}$ ,绘制它们随比例深度变化的曲线如图7所示. 结果显示: 1) 14种条件下,气泡的下半部分呈半球形, $R_{x\max}$ 与 $R_{y\max\text{下}}$ 尺寸相当,说明自由水面仅对气泡上半部分产生影响; 2) 当 $d/R_m = 0$ 时,气泡最大半径 $R_{x\max}$ 约为深水爆炸气泡最大半径 $R_{x\max\text{深}}$ 的1.4倍; 3) 当 $d/R_m \leq 0.502$ 时,气泡膨胀初期便发生破裂, $h_{y\max\text{上}} < R_{x\max}$ ; 4) 当 $0.603 \leq d/R_m \leq 1$ 时,虽然起爆深度小于气泡的最大半径,但实际测量的 $h_{y\max\text{上}}$ 为起爆深度和水冢上升高度之和, $h_{y\max\text{上}} > R_{x\max}$ ; 5) 当 $1 \leq d/R_m \leq 1.412$ 时,起爆深度大于气泡最大半径,气泡呈卵形, $h_{y\max\text{上}} > R_{x\max}$ ; 6) 当 $d/R_m \geq 1.615$ 时,气泡呈球形, $R_{x\max} = R_{y\max\text{下}} = h_{y\max\text{上}}$ .

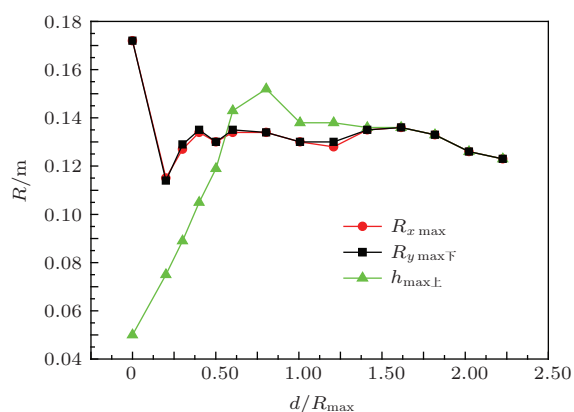


图7 气泡各向尺寸随比例深度的变化

#### 3.2.2 气泡脉动周期

记录14种条件下,气泡膨胀时间 $T_{\text{膨}}$ 和气泡脉动周期 $T$ ,如表1所示. 条件14为深水爆炸,其

气泡膨胀时间 $T_{\text{深膨}} = 10.75$  ms, 气泡脉动周期 $T_{\text{深}} = 21.5$  ms, 显然 $T = 2T_{\text{深膨}}$ . 数据显示: 1) 当 $d/R_m = 0$ 时,气泡脉动周期和膨胀时间均远大于其他条件, $T_{\text{膨}} \approx 4.4T_{\text{深膨}}$ , $T > 4.7T_{\text{深}}$ ; 2) 当 $0.201 \leq d/R_m \leq 0.502$ 时,气泡膨胀时间短,收缩时间长,即 $T > 2T_{\text{膨}}$ , $T_{\text{膨}} \approx (0.5-0.7)T_{\text{深膨}}$ , $T > 2.3T_{\text{深}}$ ; 3) 当 $0.603 \leq d/R_m \leq 1.007$ 时, $T > 2T_{\text{膨}}$ , $T_{\text{膨}} \approx (0.7-0.8)T_{\text{深膨}}$ ; 4) 当 $d/R_m \geq 1.209$ 时,气泡膨胀时间和脉动周期接近深水条件.

表1 气泡脉动周期理论值与实验值

| 条件 | 比例深度<br>$d/R_{\max}$ | 测量值/ms         |       | $T_{\text{膨}}/T_{\text{深膨}}$ | $T/T_{\text{深}}$ |
|----|----------------------|----------------|-------|------------------------------|------------------|
|    |                      | $T_{\text{膨}}$ | $T$   |                              |                  |
| 01 | 0.000                | 47.75          | >100  | 4.4                          | >4.7             |
| 02 | 0.201                | 5.25           | >50   | 0.5                          | >2.3             |
| 03 | 0.301                | 7.5            | >50   | 0.7                          | >2.3             |
| 04 | 0.401                | 6.5            | >50   | 0.6                          | >2.3             |
| 05 | 0.502                | 7.75           | >50   | 0.7                          | >2.3             |
| 06 | 0.603                | 7              | 22.5  | 0.7                          | 1.0              |
| 07 | 0.804                | 7.5            | 20.75 | 0.7                          | 1.0              |
| 08 | 1.007                | 9              | 20.25 | 0.8                          | 0.9              |
| 09 | 1.209                | 10.75          | 21.5  | 1.0                          | 1.0              |
| 10 | 1.412                | 10.5           | 21.25 | 1.0                          | 1.0              |
| 11 | 1.615                | 11             | 22.75 | 1.0                          | 1.1              |
| 12 | 1.819                | 11             | 22.5  | 1.0                          | 1.0              |
| 13 | 2.023                | 10.75          | 21.75 | 1.0                          | 1.0              |
| 14 | 2.227                | 10.75          | 21.5  | 1.0                          | 1.0              |

#### 3.2.3 气泡移动

以装药起爆后形成初始气泡的中心为坐标原点,以起爆时刻为计时零点,测量气泡上、下边界位移和两边界中心位移,并绘制曲线如图8所示. 对比4种条件下气泡边界的位移变化可知: 1) 图8(a)曲线与其他三个相比,边界移动规律最为特殊,其上表面的移动速度变化大,起爆后3.5 ms以内,气泡上表面迅速膨胀,随后气泡上表面到达水面破裂,但气泡继续缓慢膨胀. 气泡上表面的收缩过程具有初期迅速、中后期缓慢的特点,整个收缩时间非常长,超过40 ms. 2) 图8(b)和(c)气泡边界移动过程相似,气泡收缩时间比膨胀时间长,气泡中心具有下移趋势,但图8(b)中气泡膨胀时上表面超出水面,收缩时上表面位移呈直线下降,下移速度基本恒定. 图8(c)中气泡中心下移速度相对缓慢,其上表面位移呈弧线变化. 3) 图8(d)与深水爆炸气泡边界运动规律一致,表现出了良好的球形形态,且气泡膨胀收缩过程中气泡中心无上下移动,而在气泡收缩到最小时,气泡中心迅速下移.

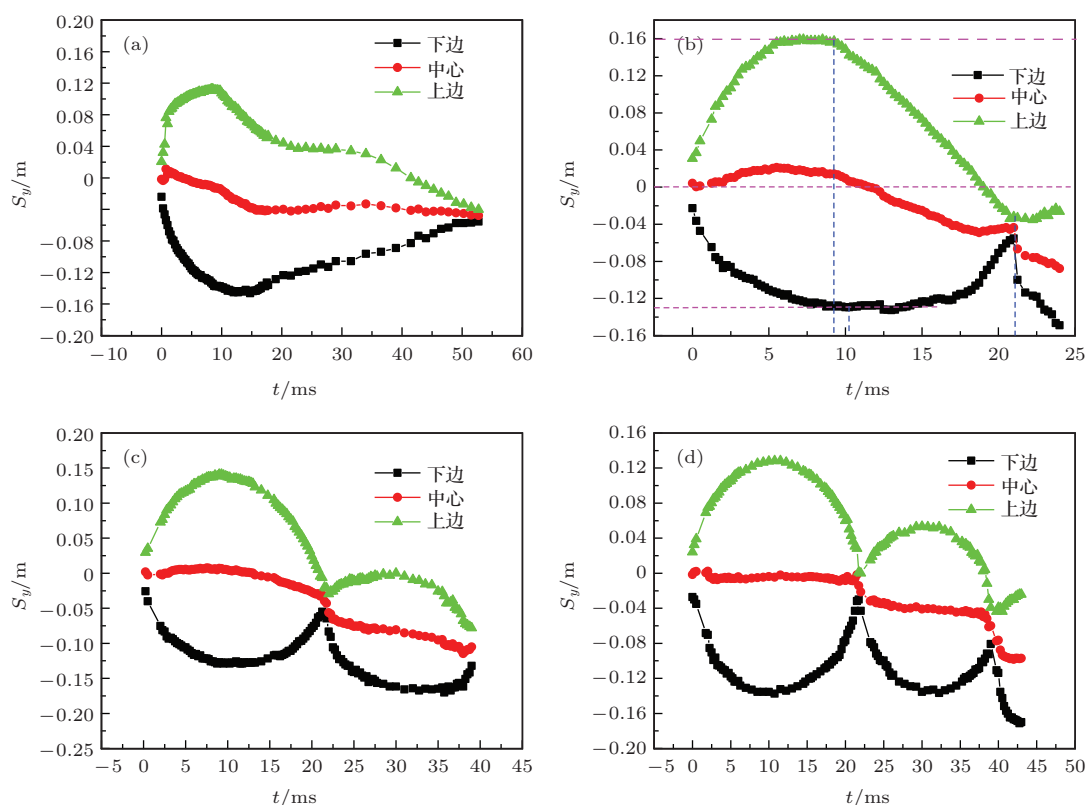


图8 气泡上、下边界位移及两边界中心位移 (a)  $d/R_m = 0.401$  ( $d = 0.06$  m); (b)  $d/R_m = 0.804$  ( $d = 0.12$  m); (c)  $d/R_m = 1.209$  ( $d = 0.18$  m); (d)  $d/R_m = 2.023$  ( $d = 0.30$  m)

## 4 结 论

本文设计了小当量RDX装药近水面水下爆炸实验系统,并进行了多种条件的水下爆炸实验.采用同步高速录像方法拍摄了气泡和水幕形态的演变过程,通过对气泡水幕形态演变规律和气泡动力过程的研究,获得主要结论如下:

1) 近水面水下爆炸时,产生径向喷射水柱、水射流、垂直喷射水柱、顶端飞散水柱、水冢、二次水冢等六种典型水幕形态,球形气泡、卵形气泡、内凹形气泡等三种气泡形态,及空穴、冲击波闪光、二次压力波闪光等水下现象.随着比例深度和上升时间的变化,水面形成2—3种水幕形态的演变过程.

2) 六种形态水幕的形成机理各不相同.径向喷射水柱和垂直喷射水柱是气泡破裂时内部爆裂产物气体向外喷射形成的,但径向喷射水柱产生于气泡膨胀初期破裂的条件,此时内部爆裂产物气体正沿径向快速运动,而垂直喷射水柱产生于气泡膨胀中后期到达水面破裂的条件,此时的气泡呈现卵形,曲率半径较小的气泡内部气体沿垂直向上的速度快速运动.水射流的形成类似于聚能射流的形成过程,是快速运动的水流沿轴线汇集产生的聚能

效应.顶端飞散水柱发生于气泡未破裂的实验条件,是气泡收缩过程中,水冢逐渐回落的结果.水冢和二次水冢分别是冲击波和二次压力波水面反射的结果.

3) 比例深度直接影响了气泡的动力学参数和运动过程.当比例深度 $d/R_m = 0$ 时, $R_{x\max} \approx 1.4R_{x\max\text{深}}$ , $T_{\text{膨}} \approx 4.4T_{\text{深膨}}$ , $T > 4.7T_{\text{深}}$ ,气泡收缩过程中,下边界向上快速移动;当 $0.201 \leq d/R_m \leq 0.502$ 时, $h_{y\max\text{上}} < R_{x\max}$ , $T_{\text{膨}} \approx (0.5-0.7)T_{\text{深膨}}$ , $T > 2.3T_{\text{深}}$ ,气泡收缩过程中,具有初期迅速、中后期缓慢的特点;当 $0.603 \leq d/R_m \leq 1.007$ 时,气泡呈现卵形形态, $h_{y\max\text{上}} > R_{x\max}$ , $T_{\text{膨}} \approx (0.7-0.8)T_{\text{深膨}}$ , $T_{\text{膨}} \approx (0.9-1.0)T_{\text{深膨}}$ ,气泡收缩过程中,气泡中心下移;当 $d/R_m \geq 1.209$ 时, $h_{y\max\text{上}} \geq R_{x\max}$ , $T_{\text{膨}} \approx T_{\text{深膨}}$ , $T \approx T_{\text{深}}$ ,气泡收缩过程中,气泡中心位置几乎不变,气泡收缩到最小时,气泡中心迅速下移.

## 参考文献

- [1] Gao J H, Lu L, He Y Y 2010 *Shallow water explosion and its destruction effect* (Beijing: National Defence Industry Press) pp38-41 (in Chinese) [高建华, 陆林, 何洋

- 扬 2010 浅水中爆炸及其破坏效应 (北京: 国防工业出版社) 第 38—41 页]
- [2] Zhi B W, Zhang Z J, Li J, Ma Y X 2009 *Trans. BIT* **29** 5 (in Chinese) [郅斌伟, 张志江, 李健, 马雨祥 2009 北京理工大学学报 **29** 5]
- [3] Kedrinskii V K (translated by Knyazeva S Y) 2005 *Hydrodynamics of Explosion Experiments and Models* (New York: Springer) pp297–347
- [4] Jiang G Y, Jin H, Li B 2009 *Sci. Technol. Review* **27** 87 (in Chinese) [蒋国岩, 金辉, 李兵 2009 科技导报 **27** 87]
- [5] Han R, Zhang A M, Li S 2014 *Chin. Phys. B* **23** 034703
- [6] Wang C H, Cheng J C 2013 *Chin. Phys. B* **22** 014304
- [7] Ni B Q, Li S, Zhang A M 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 124704 (in Chinese) [倪宝玉, 李帅, 张阿漫 2013 物理学报 **62** 124704]
- [8] Li S, Zhang A M 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 054705 (in Chinese) [李帅, 张阿漫 2014 物理学报 **63** 054705]
- [9] Blake J R, Taib B B, Doherty G 1987 *J. Fluid Mech.* **181** 197
- [10] Shervani T M T, Dadvand A, Khoo B C, Nobari M R H 2009 *Theoret. Comput. FluidDynamics* **23** 297
- [11] Wang Q X, Yeo K S, Khoo B C, Lam K Y 1996 *Theoret. Comput. Fluid Dynamics* **8** 73
- [12] Blake J R, Gibson D C 1981 *J. Fluid Mech.* **111** 123
- [13] Cole R H (translated by Luo Y J, Han R Z, Guan X) 1965 *Underwater Explosion* (Beijing: National Defence Industry Press) pp231–253 (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) 第 231—253 页]
- [14] Swisdak M M 1978 *ADA* 056694
- [15] Higdon C E 1994 *ADA* 294929
- [16] Qian D, Yuan H 2001 *Torpedo Technology* **9** 49 (in Chinese) [钱东, 袁辉 2001 鱼雷技术 **9** 49]
- [17] Zhu Q H 1999 *Inform. Comm. Contr. Syst. Simul.* **11** 14 (in Chinese) [朱庆和 1999 情报指挥控制系统和仿真技术 **11** 14]
- [18] Connor J G, Higdon C E 1996 NSWCCD/TR-96/178
- [19] Abdolrahman D, Khoo B C, Mohammad T, Shervani T 2009 *Res. Art.* **46** 419
- [20] Chahine G L, Frederick G S, Lambrecht C J, Harris G S, Mair H U 1995 *SAVIAC Proceedings 66th Shock and Vibrations Symposium* Biloxi, Oct. 30–Nov. 3, 1995 p265
- [21] 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]
- [22] Robinson P B, Blake J R, Kodama T, Shima A, Tomita Y 2001 *J. Appl. Phys.* **89** 12
- [23] Tomita Y, Kodama T, Shima A 1991 *Appl. Phys. Lett.* **59** 3
- [24] Peter G, Rok P, Janez M 2007 *J. Appl. Phys.* **102** 094904
- [25] Li M, Wang S S, Wei J F, Zhong X 2013 *J. Ship Mech.* **17** 1230 (in Chinese) [李梅, 王树山, 魏继锋, 仲霄 2013 船舶力学 **17** 1230]

# Dynamics of the interaction between explosion bubble and free surface<sup>\*</sup>

Wang Shu-Shan Li Mei<sup>†</sup> Ma Feng

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

( Received 25 March 2014; revised manuscript received 25 April 2014 )

## Abstract

A strong coupling effect between the bubble and water occurs when an explosive bubble expands and contracts near the water surface, leading to the complex changes of the flow field and various shapes of water plumes. An experimental system for small equivalent of charge RDX is designed to investigate the relations between the shapes of water plumes and the changes of the flow field. Two synchronized high speed cameras are used to record the changing process of the shapes of bubbles and water plume. Three typical shapes of bubble and six typical shapes of water plumes are observed. By theoretical analysis and direct observation of flow field changes among the bubble, the water surface, and the air, the evolution rule and formation mechanism of the six shapes of water plumes are already revealed. Experimental results are also compared with that from the experiment of bubbles formed by electric spark. Through statistical analysis of bubble radius, expansion time, pulsation period, and bubble boundary movement, the dynamic process of bubble formation in near water surface explosion is clarified.

**Keywords:** underwater explosion, plume, bubble, experiment

**PACS:** 47.55.dr, 47.55.dd, 47.54.De

**DOI:** 10.7498/aps.63.194703

---

<sup>\*</sup> Project supported by the State Key Laboratory of Explosion Science and Technology Foundation, China (Grant No: YBKT09-07).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [pulmmay@bit.edu.cn](mailto:pulmmay@bit.edu.cn)