固支方板底部水下爆炸气泡射流研究

秦健^{1,2}, 文彦博², 孟祥尧¹, 黄瑞源^{2*}

1. 海军研究院, 北京 100161;

2. 南京理工大学瞬态物理国家重点实验室, 南京 210094

*联系人, E-mail: ryhuang@njjust.edu.cn

收稿日期: 2020-10-09; 接受日期: 2021-01-20; 网络出版日期: 2021-09-29

国家自然科学基金(编号: 11402266, 11672138)和装备预研基金(编号: 614260404021801)资助项目

摘要 近场水下爆炸气泡坍塌后形成的水射流能对舰船局部结构造成严重毁伤, 而射流的形成具有非对称性, 导致试验中难以测到其数据, 目前关于水下爆炸气泡射流压力时程曲线的研究仍比较少见. 为研究水射流的载荷特性, 本文开展了当量为 2.5 g 的 TNT 炸药在不同爆距下的固支方板底部水下爆炸试验. 首先通过水下压力传感器验证了试验数据的准确性, 其次通过高速摄像得到了从炸药起爆到气泡与钢板作用产生射流全过程的图像, 最后通过钢板中心的壁压传感器测得了水射流压力时程曲线, 并在距钢板中心 15 cm 处设置了另外一组壁压传感器作为对照组, 用来确定所测得的射流数据并非杂波. 水下传感器记录到的试验数据表明, 冲击波超压、气泡脉动周期最大气泡半径与经验公式间的误差在 10% 以内. 高速摄像及壁压传感器记录到的结果显示, 爆距为 28 cm 时能观测到 3 次射流现象, 但由于爆距较远并未测到压力时程曲线, 爆距为 15, 17.5 及 20 cm 时测得了 3 次射流压力时程曲线, 但由于爆距较近, 且在冲击波作用下钢板与水面间存在大量气泡, 导致高速摄像难以观测到试验现象. 压力时程曲线显示, 在第一次气泡脉动峰值后产生了 3 次射流, 射流压力大小能达到冲击波的 1/4. 射流在第一次气泡脉动峰值后 1–3 ms 后出现, 每次射流的时间间隔在 0.9–2.4 ms 之间. 射流载荷持续时长在 4–27 μ s, 持续时间随着距离的增加而大幅减小.

关键词 近场水下爆炸, 水射流, 壁面压力, 方形板构件, 气泡脉动

PACS: 43.28.Mw, 43.50.Pn, 43.25.Cb

1 引言

舰船作为海上战争的主要作战平台, 是敌我双方最主要的攻击目标^[1]. 近年来, 随着自导鱼雷^[2]、超空泡鱼雷^[3]、机动水雷^[4]、反猎水雷^[5]等水中兵器不断发展, 舰船遭受近场水下爆炸攻击的概率越来越大.

由于近场水下爆炸对舰船的毁伤往往是致命的, 而舰船的生命力是舰船在海上作战的首要前提和基础, 所以对近场水下爆炸的研究具有十分重要的战略意义.

水下近场爆炸载荷主要有冲击波、气泡脉动和气泡射流^[6]. 以往对于水下爆炸的研究主要是针对冲击波的传播规律以及气泡脉动现象^[7–10]. 国内外学者对

引用格式: 秦健, 文彦博, 孟祥尧, 等. 固支方板底部水下爆炸气泡射流研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 124611

Qin J, Wen Y B, Meng X Y, et al. Research on bubble jet of underwater explosion at the bottom of fixed square plate (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 124611, doi: 10.1360/SSPMA-2020-0379

自由场中水下爆炸冲击波传播规律和气泡脉动规律的研究已经比较全面, 得出了许多沿用至今的水下爆炸理论^[11-13]. 由于炸药水下爆炸试验受到测试条件、水质条件、光源问题等因素的影响较大, 加之试验费用较高、安全性较差、不易操作等特点, 制约了水下爆炸气泡射流试验的广泛开展. 国内外学者广泛使用电火花气泡生成方法^[14-20]和激光气泡生成方法^[21]对气泡脉动及气泡射流现象进行机理性研究, 并将其与复杂边界^[18,19]进行作用开展机理性试验, 研究气泡与不同边界的相互作用特性. 但王树山等人^[22]指出, 电火花等方法形成的气泡内部为可冷凝的水蒸气, 而爆炸气泡内部由中心爆炸产物气体和外围水蒸气组成, 由于二者存在物理本质上的差异, 所以有必要开展水下爆炸试验. 牟金磊等人^[23]设计了靶板分别在气泡上方、侧面和下方的水下爆炸试验, 在靶板位于气泡上方工况下, 测得了一组气泡射流壁压传感器数据, 气泡射流呈“马鞍形”. 王海坤等人^[24]通过气泡在靶板上方的水下爆炸试验获得了钢板上壁压传感器的水射流压力时程曲线. 汪斌等人^[25,26]进行了小当量下的水下爆炸射流载荷的试验研究, 并结合高速摄像对不同爆距下射流的形成过程及其条件进行了探讨. 汪俊等人^[27]通过水面浮体结构底部水下爆炸试验, 用PIV (Particle Image Velocimetry)粒子测速技术得到了射流的速度. 虽然目前国内外学者对水下爆炸气泡射流开

展了一定的研究, 但因为水下爆炸产生的气泡具有非对称性, 所以射流方向不确定性较大, 导致试验中很难测得射流压力. 由于水下爆炸气泡射流压力时程曲线的研究仍比较少见, 气泡射流载荷相关规律尚不明确, 所以有必要对水下爆炸气泡射流现象进行系统研究.

为了研究近场水下爆炸气泡射流载荷特性, 本文开展了当量为2.5 g的TNT炸药在不同爆距下的固支方板底部水下爆炸试验, 通过调整炸药距钢板的距离, 得到了不同爆距下的气泡脉动和水射流高速摄影图像, 并通过铺设壁压传感器的方式, 测得了不同爆距下水射流压力时程曲线, 然后根据Blake准则^[28]分析了试验中水射流的成因, 最后讨论了气泡脉动及射流的压力特征和时间特征.

2 试验方案设计

本研究是在江苏永丰机械有限责任公司的水箱中完成的. 图1给出了试验系统布置, 试验系统由敞口水箱、高速摄像系统、钢板及其支架、炸药、压力传感器、外部光源等组成. 水箱由10 mm厚的Q235钢板焊接而成, 尺寸为2 m×2 m×2.2 m, 水箱四周设有观察窗, 观察窗由两层5 mm厚的防爆玻璃组成, 尺寸为0.6 m×0.6 m. 试验前, 水箱内壁及底部刷上一层白色涂料, 以

图 1 (网络版彩图)试验系统示意图

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of the test system.

使水中的光线强度更高从而便于高速摄像观察整个爆炸过程. 试验药柱为 2.5 g TNT 炸药, 密度为 1.654 g/cm^3 , 采用工业 8 号电雷管进行引爆, 传爆药柱为 RDX-8701 炸药, 药量为 0.3 g. 使用 3M 绝缘胶带对引爆装置进行缠结, 达到固定药柱和防水的目的. 固支钢板尺寸为 $70 \text{ cm} \times 70 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$, 材料为 Q235 钢, 在钢板四周焊上支架, 支架材料为直径 15 mm 的钢棒, 底座为 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 的钢板, 目的是使钢板在冲击波作用下保持稳定, 以便壁压传感器测量射流数据. 在钢板迎爆面的中心及距中心 15 cm 处各嵌入 1 个壁压传感器, 壁压传感器的型号为扬州科动 KD-2007, 量程为 100 MPa, 灵敏度分别为 23.4 和 28.2 pC/MPa. 这样布置壁压传感器的目的是: 以距钢板中心 15 cm 的壁压传感器为对照组, 在第一次气泡脉动后, 若中心传感器测到数据而另一传感器未测到数据, 则此数据为有效的射流数据, 若二者同时测到数据, 则此数据为杂波. 为了验证冲击波峰值与经验公式是否相符, 在距炸药 70 cm 处的水下布置 1 个水下压力传感器, 水下压力传感器的型号为 PCB 公司的 138A06, 量程为 35 MPa, 灵敏度为 143.4 pC/MPa. 在传感器下悬挂重 1.5 kg 的砝码, 使传感器的位置在试验过程中保持稳定. 高速摄像系统由高速摄像机、笔记本电脑和数据线组成, 与起爆装置及测试系统进行同步触发. 高速摄像机的拍摄间隔为 $1/3200 \text{ s}$, 图像像素为 1280×800 . 外部光源为直流式氙光灯, 在光线不足的情况下使用, 目的是提高拍摄的清晰度.

王海坤等人^[24]指出, 水下爆炸时, 距径比 γ (爆距 d

与气泡最大半径 R_m 之比) 在 1 左右时便能发生水射流, 本试验选择 0.7, 0.8, 1, 1.3 四种距径比, 分析其对水射流特性的影响和形成机理. 考虑到试验中测量的可行性, 本文确定了接近上述 4 种距径比的试验工况, 对应的爆距 d 分别为 15, 17.5, 20, 28 cm, 相应的距径比分别为 0.714, 0.833, 0.952, 1.333. 表 1 给出了具体的试验工况, 其中 $d=28 \text{ cm}$ 的 3 次试验均未测到射流数据, 这是因为水下爆炸产生的气泡具有非对称性, 导致射流方向不确定, 加上爆距较远, 从而导致射流未击中壁压传感器.

3 试验结果

3.1 试验准确性校验

为验证试验的准确性, 将水下传感器测到的数据与经验公式计算结果进行比较, 如表 2 所示. 对于自由场中水下爆炸冲击波的传递, Cole^[7]在早期通过对大量试验数据的整理, 总结了水下爆炸冲击波经验公式, 并得到广泛认可, Zamyshlyayev 和 Yakovlev^[8]在其基础上改进为

$$P_{\text{ml}} = \begin{cases} 44.1 \times \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{d} \right)^{1.5}, & 6 \leq r \leq 12, \\ 52.4 \times \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{d} \right)^{1.13}, & 12 \leq r \leq 240, \end{cases} \quad (1)$$

其中, P_{ml} 为冲击波超压, W 为炸药当量, $r = d/R_0$, d 为

表 1 试验工况及比例因子

Table 1 Test conditions and scale factor

序号	爆距 d (m)	浮力参数 σ	距径比 γ	比例因子 $\sigma\gamma$	是否测到射流
1	0.15	0.146	0.714	0.104	是
2	0.15	0.146	0.714	0.104	否
3	0.175	0.143	0.833	0.119	否
4	0.175	0.143	0.833	0.119	是
5	0.2	0.143	0.952	0.136	是
6	0.2	0.143	0.952	0.136	否
7	0.2	0.143	0.952	0.136	否
8	0.28	0.142	1.333	0.189	否
9	0.28	0.142	1.333	0.189	否
10	0.28	0.142	1.333	0.189	否

表 2 水下传感器数据与经验公式比较

Table 2 Comparison of underwater sensor data and empirical formula calculation results

序号	传感器距离 (cm)	冲击波压力 (MPa)		
		试验值	经验公式	误差 (%)
1	70.18	7.64	8.19	6.72
2	70.18	7.49	8.19	8.55
3	70.04	7.72	8.20	5.85
4	70.04	7.79	8.20	5.00
5	70.00	7.81	8.21	4.87
6	70.00	7.77	8.21	5.36
7	70.00	7.91	8.21	3.65
8	70.46	7.54	8.15	7.49
9	70.46	7.61	8.15	6.63
10	70.46	7.58	8.15	6.99

测点到爆心的距离, R_0 为药包半径.

从表2中可以看出, 试验数据与经验公式之间的误差在10%以内, 且相同工况下的试验偏差在3%以内, 说明试验数据是有效的.

3.2 气泡脉动

表3给出了不同爆距TNT水下爆炸试验测得的气泡脉动周期和气泡膨胀最大半径与经验公式间的对比, 在TNT炸药的水下爆炸中, 对于第一次气泡脉动周期 T 和气泡膨胀最大半径 $R_{\max}$ 有以下经验公式^[29]:

$$T = 2.11 \times \frac{W^{\frac{1}{3}}}{(h+10)^{\frac{5}{6}}}, \quad (2)$$

$$R_{\max} = 3.5 \times \left(\frac{W}{h+10} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (3)$$

其中 h 为炸药深度.

从表3中可以看出, 气泡脉动周期和气泡膨胀最大半径与经验公式之间误差均在6%以内, 且随着水深的增加, 误差呈上升趋势. 其原因为, 经验公式适用的范围是无限水域, 而试验是在2 m×2 m×2.2 m的有限水域中进行的, 在有限水域中气泡的脉动会受到四周壁面反射的冲击波的影响, 导致气泡脉动周期和气泡膨胀最大半径的试验值小于理论值.

3.3 高速摄像测试结果

图2给出了爆距为28 cm时从炸药起爆到射流结束全过程的高速摄影图像. 炸药起爆后发生剧烈的化学反应, 出现亮光, 0–19.69 ms爆炸产生的高温高压气体开始膨胀, 19.69–40 ms气泡膨胀到最大体积后开始收缩, 在40.94 ms时气泡体积收缩到最小, 第一次气泡脉动结束; 40.94 ms可以看到一束气液混合物高速冲向钢板, 40.94–49.06 ms观察到高压气体再次膨胀呈不规则球形, 49.06–62.5 ms气泡再次缩小完成第二次气泡脉动射流过程; 62.5–80 ms气泡再次膨胀、缩小, 完成第三次气泡脉动. 但由于射流方向并非垂直向上, 而是存在一定的角度, 加上爆距较远, 射流未击中中心壁压

表 3 气泡脉动周期及最大半径与经验公式比较

Table 3 Comparison of the bubble pulse period and the maximum radius with calculation results of empirical formula

序号	水深 (m)	气泡脉动周期 (ms)			气泡膨胀最大半径 (m)		
		试验值	经验公式	误差 (%)	试验值	经验公式	误差 (%)
1	0.15	39.53	41.51	4.78	0.218	0.219	0.555
2	0.15	39.64	41.51	4.52	0.218	0.219	0.555
3	0.175	39.47	41.43	4.73	0.217	0.219	0.913
4	0.175	39.11	41.43	5.60	0.216	0.219	1.39
5	0.2	39.21	41.35	5.16	0.214	0.219	2.30
6	0.2	39.17	41.35	5.26	0.216	0.219	1.39
7	0.2	39.22	41.35	5.15	0.216	0.219	1.39
8	0.28	39.12	41.08	4.76	0.210	0.218	3.88
9	0.28	39.05	41.08	4.93	0.213	0.218	2.50
10	0.28	39.14	41.08	4.72	0.212	0.218	2.96

传感器, 导致本次试验壁压传感器并未测到射流数据. 图3给出了爆距为15 cm时的高速摄影图像, 在爆距为15, 17.5, 20 cm的试验中, 在冲击波的作用下钢板与水面间存在气泡层, 如图3(e)所示, 导致难以观察到射流现象, 但由于爆距较近, 射流击中了中心壁压传感器, 所以壁压传感器记录到了三种工况下的气泡射流压力时程曲线.

3.4 压力传感器测试结果

图4-6分别给出了 $d=15$ cm, $d=17.5$ cm和 $d=20$ cm时的压力时程曲线, 中心传感器在第一次气泡脉动峰值压力后均记录到3次峰值数据, 且侧方传感器并未

记录到该数据, 故排除该组波峰为杂波的可能, 那么这3次峰值均是气泡射流导致的. 以图4为例, 在图4(a)中, 中心壁压传感器冲击波超压理论值为46.80 MPa, 试验值为80.75 MPa, 试验值约为理论值的1.73倍, 侧方壁压传感器冲击波峰值理论值为31.64 MPa, 试验值为55.66 MPa, 试验值约为理论值的1.76倍, 说明壁压传感器测得的数据是合理的^[24]. 图4(b)中39 ms时水下压力传感器测到气泡脉动峰值压力, 但图4(a)中壁压传感器并无气泡脉动峰值压力出现, 其原因为液面与壁压传感器间存在大量气泡, 气泡脉动峰值压力波经过复杂的透反射未能到达壁压传感器, 而射流能穿过液面与传感器间的气泡层, 故能测到射流数据.

图2 (网络版彩图) $d=28$ cm时气泡射流演变过程. (a) $t=0.00$ ms; (b) $t=10.00$ ms; (c) $t=19.69$ ms; (d) $t=35.00$ ms; (e) $t=40.00$ ms; (f) $t=40.94$ ms; (g) $t=43.75$ ms; (h) $t=49.06$ ms; (i) $t=60.25$ ms; (j) $t=61.30$ ms; (k) $t=65.25$ ms; (l) $t=67.19$ ms; (m) $t=70.25$ ms; (n) $t=75.30$ ms; (o) $t=80.00$ ms

Figure 2 (Color online) The evolution process of bubble jet when $d=28$ cm. (a) $t=0.00$ ms; (b) $t=10.00$ ms; (c) $t=19.69$ ms; (d) $t=35.00$ ms; (e) $t=40.00$ ms; (f) $t=40.94$ ms; (g) $t=43.75$ ms; (h) $t=49.06$ ms; (i) $t=60.25$ ms; (j) $t=61.30$ ms; (k) $t=65.25$ ms; (l) $t=67.19$ ms; (m) $t=70.25$ ms; (n) $t=75.30$ ms; (o) $t=80.00$ ms.

图3 (网络版彩图) $d=15$ cm时气泡射流演变过程. (a) $t=0.00$ ms; (b) $t=19.06$ ms; (c) $t=33.75$ ms; (d) $t=39.06$ ms; (e) $t=39.69$ ms; (f) $t=41.9$ ms; (g) $t=42.5$ ms; (h) $t=44.1$ ms; (i) $t=45.0$ ms; (j) $t=46.6$ ms

Figure 3 (Color online) The evolution process of bubble jet when $d=15$ cm. (a) $t=0.00$ ms; (b) $t=19.06$ ms; (c) $t=33.75$ ms; (d) $t=39.06$ ms; (e) $t=39.69$ ms; (f) $t=41.9$ ms; (g) $t=42.5$ ms; (h) $t=44.1$ ms; (i) $t=45.0$ ms; (j) $t=46.6$ ms.

图 4 (网络版彩图) $d=15$ cm 时传感器测得的压力时程曲线。(a) 壁压传感器数据; (b) 水下传感器数据; (c) 射流1; (d) 射流2; (e) 射流3

Figure 4 (Color online) Pressure time history curve measured by the sensor when $d=15$ cm. (a) Data from the wall pressure sensors; (b) data from underwater sensors; (c) the first jet; (d) the second jet; (e) the third jet.

4 分析和讨论

4.1 射流的形成

炸药爆炸时产生的高温高压气体向周围膨胀, 由于钢板的存在, 气泡向上方膨胀受阻, 在浮力与阻力共同作用下, 气泡上半部分呈扁平, 下半部分呈球形, 气泡收缩时, 钢板阻碍了上方水流向气泡中心流动, 使得其他方向的水流速度比气泡顶部水流流速快, 在水流、浮力、以及钢板的引力作用下, 气泡收缩过程中底部出现塌陷, 形成水射流. 无量纲数是研究水下爆炸问题的重要方法之一^[29], 基于Blake等人^[28]对水射流的研究, 水射流形成的方向可由如下比例因子进行判定, 如式(2)所示:

$$\gamma\sigma = \left(\frac{s}{R_0}\right) \times \left(\frac{\rho g R_0}{P_0 + \rho g h - P_c}\right)^{1/2}, \quad (4)$$

其中 s 为气泡中心到边界的距离, ρ 为流体的密度, σ 为

比例浮力, g 为重力加速度, h 为炸药深度, P_0 为大气压, P_c 为饱和蒸气压(20°C 时, $P_c=2388$ Pa).

由开尔文冲量理论可知, 射流的形成及方向由 Bjerkness 引力和浮力共同作用决定, 且当 $\gamma\sigma < 0.442$ 时气泡产生冲向靶板的射流, 但许多学者指出, 由于 Blake 采用过于理想化的模型, 所以该结论有一定的局限性.

将不同距径比的比例因子填入表 1, 比例因子均小于 0.442, 可见本文试验工况均满足发生 Bjerkness 射流的条件. 另外, 根据试验结果, 比例因子在 0.104–0.189 范围内, 可能出现多次射流现象.

4.2 三种距离下气泡及射流载荷的时间特性

表 4 给出了 $d=15$ cm, $d=17.5$ cm 以及 $d=20$ cm 时气泡脉动压力峰值及射流压力峰值出现的时间, $d=15$ cm 时射流之间的时间间隔分别为 3, 2.1, 2.4 ms, $d=$

图 5 (网络版彩图) $d=17.5$ cm 时传感器测得的压力时程曲线. (a) 壁压传感器数据; (b) 水下传感器数据; (c) 射流1; (d) 射流2; (e) 射流3

Figure 5 (Color online) Pressure time history curve measured by the sensor when $d=17.5$ cm. (a) Data from the wall pressure sensors; (b) data from underwater sensors; (c) the first jet; (d) the second jet; (e) the third jet.

17.5 cm 时射流之间的时间间隔分别为 1, 2.3, 2.2 ms, $d=20$ cm 时射流之间的时间间隔分别为 1, 0.8, 0.9 ms. 射流之间的时间间隔规律为随着爆心与板的距离增加而减小. 表 5 给出了 $d=15$ cm, $d=17.5$ cm 以及 $d=20$ cm 时三次射流载荷及气泡脉动载荷的持续时长, 射流载荷持续时长在 4–27 μ s, 射流波形放大图如图 4–6 所示, $d=15$ cm 时, 射流载荷平均持续时长为 22 μ s; $d=17.5$ cm 时, 射流载荷平均持续时长为 15 μ s, 为 $d=15$ cm 时的 68%; $d=20$ cm 时, 射流载荷平均持续时长为 8.7 μ s, 为 $d=15$ cm 时的 40%. 射流载荷平均持续时长随距离的增加呈递减趋势. $d=15$ cm 时, 结合图 3 可以看出在冲击波作用下, 钢板与水之间产生大量气泡, 导致气泡脉动压力峰值无法到达壁压传感器; $d=17.5$ cm 时, 气泡较少, 气泡脉动压力部分到达壁压传感器, 气泡载荷持续时长为 35 μ s; $d=20$ cm 时, 气泡更少, 气泡脉动压力大部分到达传感器, 气泡脉动压力载荷持续时长为 50 μ s.

表 4 三次试验载荷峰值出现时间

Table 4 The time when the load peak appears in the three tests

爆心距钢板 距离 (cm)	载荷峰值出现时间 (ms)			
	气泡	射流1	射流2	射流3
15	39	42	44.1	46.5
17.5	39	40	43.3	45.5
20	39	40	40.8	41.7

表 5 三次试验气泡及射流载荷正压作用时间

Table 5 Positive pressure action time of the bubble load and the jet load in the three tests

爆心距钢板 距离 (cm)	载荷持续时长 (μ s)			
	气泡峰值	射流1	射流2	射流3
15	—	27	25	17
17.5	35	25	10	10
20	50	7	15	4

图 6 (网络版彩图) $d=20$ cm 时传感器测得的压力时程曲线。(a) 壁压传感器数据; (b) 水下传感器数据; (c) 射流1; (d) 射流2; (e) 射流3

Figure 6 (Color online) Pressure time history curve measured by the sensor when $d=20$ cm. (a) Data from the wall pressure sensors; (b) data from underwater sensors; (c) the first jet; (d) the second jet; (e) the third jet.

4.3 三种距离下射流峰值压力对比

表6给出了三次试验射流超压峰值数据, 图7给出了三次射流峰值的对比, 图中显示, $d=15$ cm 和 $d=20$ cm 时, 三次射流峰值变化呈“金字塔”型, 其原因: 第一次射流前的气泡距离钢板较远, 第二次射流前的气泡在浮力和钢板吸引力作用下上浮, 故第二次射流峰值比第一次射流大, 第三次射流由于气泡中残余

的能量较少, 故峰值小于第二次射流。

图8给出了爆距与射流峰值的关系, 图中射流2数据显示, $d=15$ cm 时射流载荷峰值压力为 $d=17.5$ cm 时的2.52倍, 为 $d=20$ cm 时的5.75倍; 射流3数据显示, $d=15$ cm 时射流载荷峰值压力为 $d=17.5$ cm 时的3.34倍, 为 $d=20$ cm 时的7.11倍。从三次数据平均值来看, $d=15$ cm 时射流峰值为 $d=17.5$ cm 时的1.82倍, 为 $d=20$ cm 时的6.61倍, 可以看出射流载荷峰值随爆炸距离增加大幅度地减小。

表 6 射流峰值压力

Table 6 Peak pressure of the jets

爆心深度 (cm)	射流峰值压力 (MPa)		
	射流1	射流2	射流3
15	14.94	23.91	15.50
17.5	15.68	9.47	4.64
20	1.90	4.16	2.18

5 结论

为了研究近场水下爆炸气泡射流载荷特性, 本文开展了2.5 g TNT当量4种爆距下固支方板底部水下爆炸系列试验, 得到了从炸药起爆到水射流形成全过程的压力时程曲线及高速摄像图像, 通过观察及对比不

图 7 (网络版彩图)三次射流峰值对比

Figure 7 (Color online) Peak comparison of three jets.

图 8 (网络版彩图)爆距与射流压力峰值关系

Figure 8 (Color online) Relationship between the explosion distance and the jet peak.

同工况下的试验数据得出以下结论.

(1) 为了验证实验数据的准确性, 将经验公式计算值和水下传感器测得的数据进行对比, 结果表明, 水下传感器测得的冲击波峰值与经验公式误差在10%以内, 相同工况下偏差在3%以内, 气泡脉动周期及最大气泡半径均小于采用经验公式计算的结果, 误差在6%以内, 这是因为在有限水域中气泡的脉动会受到四周壁面反射的冲击波的影响, 导致气泡脉动周期和气泡膨胀最大半径的试验值小于理论值. 综上所述, 可以看出本文试验数据是有效的.

(2) 利用壁压传感器和高速摄像测得了从炸药起爆到产生水射流全过程的图像及压力时程曲线, 试验结果显示, 爆距为28 cm时, 通过高速摄像能明显地观

察到3次气泡射流现象. 爆距为20, 17.5及15 cm时, 壁压传感器均测到了3次射流数据.

(3) 不同爆距下测得的水射流压力时程曲线显示, 爆距为15 cm时三次射流压力分别为14.94, 23.91, 15.50 MPa; 爆距为17.5 cm时三次射流压力分别为15.68, 9.47, 4.64 MPa; 爆距为20 cm时三次射流压力分别为1.90, 4.16, 2.18 MPa, 射流压力峰值最大能达到冲击波峰值的1/4, 且射流载荷峰值随爆炸距离增加大幅度减小. 第一次射流在第一次气泡脉动峰值后1–3 ms后出现, 第一次射流、第二次射流、第三次射流的时间间隔在0.9–2.4 ms. 射流载荷持续时长在4–27 μ s, 且射流持续时间随着爆距的增加而大幅减小.

参考文献

- 1 Zhang Z H, Wang Y. "Blade effect" on the overall damage of hull girder caused by near field undex shock wave (in Chinese). *Sci Sin Phys Mech Astron*, 2015, 45: 67–80 [张振华, 汪玉. 近距水爆冲击波对船体梁总体毁伤的“刀锋效应”. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2015, 45: 67–80]
- 2 He X Y, Lu J, Zhang S Y, et al. Research status and enlightenment of foreign torpedoes (in Chinese). *Digital Ocean Underwater Warfare*, 2020, 3: 87–93 [何心怡, 卢军, 张思宇, 等. 国外鱼雷现状与启示. *数字海洋与水下攻防*, 2020, 3: 87–93]
- 3 Jin D Q, Wang C, Yu F. A review of underwater supercavitating projectiles (in Chinese). *Winged Missile*, 2010, 7: 19–23 [金大桥, 王聪, 余锋. 水下超空泡射弹研究综述. *飞航导弹*, 2010, 7: 19–23]
- 4 Wei J F, Jin Z Y, Xie X, et al. Development and enlightenment of bottom mine (in Chinese). *J Ordnance Equipm Eng*, 2017, 38: 22–25 [魏继锋, 金子焱, 谢鑫, 等. 国外沉底雷技术的发展和启示. *兵器装备工程学报*, 2017, 38: 22–25]
- 5 Wang X J. The application of mine stealth technology in anti-sweeping and anti-hunting (in Chinese). *Mine Warfare Ship Protect*, 2013, 21: 59–62 [王绪军. 隐身技术在水雷抗扫反猎中的应用. *水雷战与舰船防护*, 2013, 21: 59–62]
- 6 Sun Y X, Tian J H. Review of near-field underwater explosion load and ship structure dynamic response (in Chinese). *Ship Sci Tech*, 2019, 41: 1–8 [孙远翔, 田俊宏. 近场水下爆炸载荷及舰船结构动态响应研究综述. *舰船科学技术*, 2019, 41: 1–8]

- 7 Cole R H. Underwater Explosion. New Jersey: Princeton University Press, 1948. 118–127
- 8 Zamyshlyayev B V, Yakovlev Y S. Dynamic Loads in Underwater Explosion. Technical Report. AD-757183. 1972. 86–120
- 9 Shima A, Tomita Y, Gibson D C, et al. The growth and collapse of cavitation bubbles near composite surfaces. *J Fluid Mech*, 1989, 203: 199–214
- 10 Temperlev H N V, Craig J. Calculation from thermodynamical and hydrodynamical considerations of underwater shock-waves for spherical charges. *Compend Underwater Explos Res*, 1950, 3: 347–373
- 11 Brinkley S R, Kirkwood J G. Theory of the shock wave produced by an underwater explosion. *Compend Underwater Explos Res*, 1950, 3: 383–497
- 12 Friedman B. Theory of underwater explosion bubbles. *Compend Underwater Explos Res*, 1950, 3: 177–199
- 13 Bryant A R. The behavior of an underwater explosion bubble. *Compend Underwater Explos Res*, 1950, 3: 163–183
- 14 Naude C F, Ellis A T. On the mechanism of cavitation damage by nonhemispherical cavities collapsing in contact with a solid boundary. *J Basic Eng*, 1961, 83: 648–656
- 15 Shutler N D, Mesler R B. A photographic study of the dynamics and damage capabilities of bubbles collapsing near solid boundaries. *J Basic Eng*, 1965, 87: 511–517
- 16 Benjamin T B, Ellis A T. A discussion on deformation of solids by the impact of liquids, and its relation to rain damage in aircraft and missiles, to blade erosion in steam turbines, and to cavitation erosion—The collapse of cavitation bubbles and the pressures thereby produced against solid boundaries. *Phil Trans R Soc Lond A*, 1966, 260: 221–240
- 17 Chahine G L, Frederick G S, Lambrecht C J, et al. Spark-generated bubbles as laboratory-scale models of underwater explosions and their use for validation of simulation tools. In: SAVIAC Proceedings of the 66th Shock and Vibrations Symposium. Biloxi, 1995, 2: 265–276
- 18 Wu C. Experimental Research on Dynamic Characteristics of Underwater Bubble near Ship Side and Complicated Boundaries (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Harbin: Harbin Engineering University, 2012 [吴超. 舷侧及不同特征边界条件下水下气泡动态特性试验研究. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012]
- 19 Wang S P, Cheng X D, Zhang A M, et al. Tests for interaction of underwater bubbles and a ship bulbous bow (in Chinese). *J Vib Shock*, 2012, 31: 96–100, 162 [王诗平, 程晓达, 张阿漫, 等. 气泡与球鼻艏结构相互作用试验研究. *振动与冲击*, 2012, 31: 96–100, 162]
- 20 Li S, Zhang A M. Study on a rising bubble bouncing near a rigid boundary (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2014, 63: 266–272 [李帅, 张阿漫. 上浮气泡在壁面处的弹跳特性研究. *物理学报*, 2014, 63: 266–272]
- 21 Zong S G, Wang J A, Liu T, et al. Characteristics of explosion bubbles generated by laser induced breakdown in liquids (in Chinese). *Exp Shock Waves*, 2011, 31: 641–646 [宗思光, 王江安, 刘涛, 等. 激光聚焦击穿液体的爆炸气泡特性. *爆炸与冲击*, 2011, 31: 641–646]
- 22 Wang S S, Li M, Ma F. Dynamics of the interaction between explosion bubble and free surface (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2014, 63: 239–248 [王树山, 李梅, 马峰. 爆炸气泡与自由水面相互作用动力学研究. *物理学报*, 2014, 63: 239–248]
- 23 Mou J L, Zhu X, Huang X M, et al. Experimental study of jets formed by bubbles from underwater explosion (in Chinese). *J Harbin Eng Univ*, 2010, 31: 154–158 [牟金磊, 朱锡, 黄晓明, 等. 水下爆炸气泡射流现象的试验研究. *哈尔滨工程大学学报*, 2010, 31: 154–158]
- 24 Wang H K, Liu J H, Mao H B, et al. Photoelectric combined measurements of underwater explosion bubble and jet (in Chinese). *Protect Eng*, 2015, 4: 36–42 [王海坤, 刘建湖, 毛海斌, 等. 水下爆炸气泡及其射流的光电联合测量研究. *防护工程*, 2015, 4: 36–42]
- 25 Wang B, Tan D W. Water jet phenomenon caused by underwater explosions (in Chinese). *J Harbin Eng Univ*, 2010, 31: 42–46 [汪斌, 谭多望. 水中爆炸形成水射流现象的试验研究. *哈尔滨工程大学学报*, 2010, 31: 42–46]
- 26 Wang B, Wang Y P, Zhang Y P. A method of studying bubble pulses in a confined water area (in Chinese). *Chin J Exp Propell*, 2008, 31: 32–35 [汪斌, 王彦平, 张远平. 有限水域气泡脉动实验方法研究. *火炸药学报*, 2008, 31: 32–35]
- 27 Wang J, Meng L P, Wu X X, et al. Experimental study on underwater explosion jet flow at the bottom of floating structure on water (in Chinese). In: China Shipbuilding Engineering Society Ship Mechanics Academic Committee. Proceedings of 2019 Ship Structure Mechanics Academic Conference. Beijing: China Shipbuilding Engineering Society, 2019. 642–648 [汪俊, 孟利平, 伍星星, 等. 水面浮体结构底部水下爆炸射流试验研究. 见: 中国造船工程学会船舶力学学术委员会. 2019年船舶结构力学学术会议论文集. 北京: 中国造船工程学会, 2019. 642–648]
- 28 Blake J R, Gibson D C. Cavitation bubbles near boundaries. *Annu Rev Fluid Mech*, 1987, 19: 99–123
- 29 Zhao Y P. Suggestion of a new dimensionless number for dynamic plastic response of beams and plates. *Archiv Appl Mech*, 1998, 68: 524–538

Research on bubble jet of underwater explosion at the bottom of fixed square plate

QIN Jian^{1,2}, WEN YanBo², MENG XiangYao¹ & HUANG RuiYuan^{2*}

¹ Naval Research Institute, Beijing 100161, China;

² State Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

The water jet formed after the collapse of the bubble in the near-field underwater explosion can cause serious damage to the local structure of the ship, and the formation of the jet is asymmetric, which makes it difficult to measure its data in the experiment. At present, studies on the pressure time history curves of the bubble jet in the underwater explosion are still relatively rare. In order to study the characteristics of the jet, the underwater explosion test of 2.5 g TNT explosive at the bottom of fixed square plate at different detonation distances was carried out. First, the accuracy of the test data was verified by the underwater pressure sensor. Second, the image of the whole process from the explosive initiation to the bubble jet generated by the action of the bubble and the steel plate was obtained by high-speed camera. Finally, the time-history curve of water jet pressure was measured by the wall pressure sensor in the center of the steel plate, and another group of wall pressure sensors was set 15 cm away from the center of the steel plate as a control group to ensure that the measured jet data were not clutter. The test data recorded by the underwater sensor show that the error between the shock wave overpressure, the maximum bubble radius of the bubble pulse period and the empirical formula is within 10%. The results recorded by the high-speed camera and wall pressure sensor show that three jets can be observed when the burst distance is 28 cm, but the pressure time history curve is not measured due to the long burst distance. When the burst distances are 15, 17.5 and 20 cm, three jet pressure time history curves are measured. However, due to the short burst distance and the presence of a large number of bubbles between the steel plate and the water surface under the action of the shock wave, it is difficult to observe the test phenomenon with high-speed cameras. The pressure time history curve shows that three jets are generated after the first bubble pulse peak, and the jet pressure can reach 1/4 of the shock wave. The jet appears 1–3 ms after the first bubble pulse peak, and the time interval of each jet is between 0.9 and 2.4 ms. The duration of jet load is between 4–27 μ s, and it is greatly reduced as the distance increases.

near-field underwater explosion, water jet, wall pressure, square plate member, bubble pulsation

PACS: 43.28.Mw, 43.50.Pn, 43.25.Cb

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0379](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0379)