

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0212

气泡及其破碎兴波对浮动冲击平台影响探究*

王志凯¹, 周 鹏², 孙 波¹, 姚熊亮¹, 杨娜娜¹

(1. 哈尔滨工程大学船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工程大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 基于 LS-DYNA 软件中的 ALE 算法, 对近水面水下爆炸气泡脉动过程进行数值模拟并与实验结果进行对比, 验证了近水面近壁面混合边界有限元模型和参数设置的正确性。设置不同爆炸工况, 对气泡及其破碎兴波对浮动冲击平台影响进行探究, 结果表明: 在水下爆炸过程中, 气泡、自由面、浮动冲击平台会发生强烈的耦合作用, 在气泡脉动阶段, 气泡会诱导出涌流和水泵效应, 影响浮动冲击平台的安全性和使用性; 冲击波是影响浮动冲击平台冲击环境的主要因素, 由于气泡的低频性, 气泡脉动及水泵对浮动冲击平台的直接冲击作用, 会小幅度增加浮动冲击平台冲击环境的谱速度值、谱位移值, 对谱加速度值几乎无影响; 水泵抨击水面所形成的波浪和气泡破碎兴波, 对浮动冲击平台造成的激励载荷呈周期性, 其周期与波浪周期相同。波浪的激励载荷仅通过激励其对应频率的浮动冲击平台共振来改变平台的冲击环境。波浪载荷很小, 对浮动冲击平台的冲击环境影响较小。

关键词: 气泡脉动; 浮动冲击平台; 冲击环境; 水下爆炸

中图分类号: O383.1

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

舰艇生命力及其作战效能是作战舰艇能够发挥其攻防效能的关键, 而舰载设备系统抗爆抗冲击能力作为其中十分重要的技术指标, 直接影响舰艇海上作战能力, 各海军强国对此均非常重视, 并投入大量资源进行研究^[1]。但实船实验周期长、耗费成本高、实施难度大、危险性高、且具有不可重复性。故目前世界各国主要是运用不同实验装备代替实船进行考察为主, 数值模拟计算为辅进行考察^[2]。小型舰载设备的实验装备主要是陆上冲击机, 大型舰载设备主要采用浮动冲击平台 (floating shock platform) 作为其标准实验装备^[3] (以下简称平台或 FSP)。

实验时, 炸药产生的冲击波传播到水面和海底时会形成反射波即水面截断效应, 同时, 自由面的空泡和气泡脉动, 气泡、自由面、平台相互耦合, 过程十分复杂。气泡在经过脉动后上浮到自由面处会发生破碎, 在破碎的自由面附近产生明显的初始扰动, 产生较为特殊的兴波现象; 在自由面处产生十几米甚至几十米的水泵, 水泵形成时可能会直接冲击平台, 改变平台状态。当水泵上升到最高位置时, 由于重力作用, 会产生自由落体运动, 引起自由面的扰动, 在落水中心处产生向外部扩散的波浪, 对周围的平台产生力的作用, 在一定程度上改变平台运动状态。而气泡脉动过程中, 因为气泡载荷的低频性, 水中物体不仅会被水下爆炸气泡载荷造成严重损伤, 还会出现比较大的刚体位移, 而在以往的理论 and 数值研究中, 这种现象都被忽略^[4-6]。同时, Zhang 等^[7] 发现当长宽比较小的舰船结构承受水下爆炸载荷时, 舰船刚体运动占整个运动比例较大, 不可忽略。当气泡上浮到自由面处时发生破裂, 在破裂的自由面附近产生明显的初始扰动, 进一步形成较为特殊的兴波现象。这一现象已经探讨得比较深入^[8-9], 特别是 Wang^[10] 的工作中, 运用边界元方法发现气泡破碎后产生的兴波包含很大一部分能量。而冲击环境则是单自由度系统受到外界环境激励时, 质量的相对位移或速度或加速度最大的幅值随频率变化的关系。

* 收稿日期: 2018-06-19; 修回日期: 2019-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(11602069, 51779056); 黑龙江省自然科学基金(E2017026);
中国博士后科学基金(2017M611359)支持

第一作者: 王志凯(1989—), 男, 博士, 讲师, wangzhikai@hrbeu.edu.cn;

通信作者: 姚熊亮(1963—), 男, 博士, 教授, yaoxiongliang@hrbeu.edu.cn。

对于固定系统,当不同激励作用时,造成系统的冲击环境不同,而整个水下爆炸过程中,平台承受的外界激励种类较多(冲击波、气泡脉动与水泵推动、后期气泡兴波等),而在以往冲击环境计算中几乎都是只考虑冲击波作用影响^[11-12],而忽略气泡脉动、水泵、涌流、后期波浪的影响。

本文中利用 LS-DYNA 软件模拟整个气泡、自由面、平台的耦合过程,考虑气泡脉动及其破碎兴波、水泵、涌流等作用,探讨水下爆炸过程中平台运动变化与冲击环境变化情况。

1 近水面近壁面混合边界气泡动力学特性分析及模型验证

1.1 有限元模型

实际冲击平台考察设备时,当考察点距离平台较近时,气泡不仅受到自由面的强烈作用还会受到平台的作用,实验数据来自文献 [13], 4 g PETN 混合炸药(可等效为 5.2 g TNT 炸药)在 2 m 长的钢制正方体水箱中进行水下爆炸实验,爆心位于水下 0.26 m, 距离刚性壁面 0.19 m。有限元模型中炸药、水、空气采用多物质 ALE 算法,空气域与水域均为边长 2 m 的立方体,采用单元类型为欧拉四面体的渐变网格,药包附近网格尺寸最小,为 0.9 mm。流域边缘网格尺寸最大,为 0.6 m。流域网格总数为 160 万; TNT 为当量 5.2 g 的球形药包,布放位置与对应实验工况相同;欧拉域四周与底面设置刚性壁面,顶部添加大气压力。工况示意图如图 1 所示。

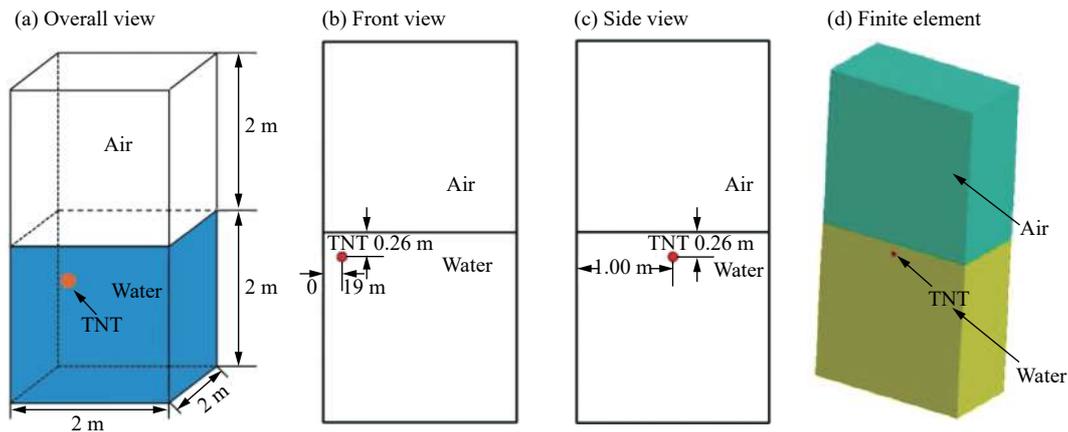


图 1 混合边界条件时工况示意图及有限元图

Fig. 1 Illustration of working and finite element view in complex boundary conditions

1.1.1 空气

空气的状态方程为理想气体状态方程:

$$p_g = (\gamma - 1)\rho E \quad (1)$$

式中: p_g 是空气压力, ρ 是空气密度, $\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$, γ 是绝热指数, $\gamma=1.4$, E 是空气内能, $E=2.11 \times 10^5 \text{ J/kg}$ 。

1.1.2 水

水的状态方程采用 Grüneisen 状态方程,在 LS-DYNA 中通过 *MAT_NALL 材料模型实现:

$$p_w = \frac{\rho_0 c^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{1 + \mu} - S_3 \frac{\mu^3}{(1 + \mu)^2} \right]} + (\gamma_0 + \alpha\mu)E \quad (2)$$

式中: p_w 为水的压力; μ 为水的压缩系数, $\mu = \rho / \rho_0 - 1$; 水的初始密度 $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$; c 为水中声速, $c = 1500 \text{ m/s}$; S_1 、 S_2 、 S_3 为曲线拟合参数, $S_1 = 2.56$, $S_2 = 1.986$, $S_3 = 1.2268$; γ_0 为 Grüneisen 参数, $\gamma_0 = 0.5$; α 为 μ 和 γ_0 的一阶体积修正量, $\alpha = 0$; E 为水的体积内能,单位为 J/m^3 。

1.1.3 TNT 炸药

通过 JWL 状态方程对 TNT 炸药的爆炸状态进行描述, 其表现形式为:

$$p_T = A \left(1 - \frac{\omega\eta}{R_1} \right) e^{-(R_1/\eta)} + B \left(1 - \frac{\omega\eta}{R_2} \right) e^{-(R_2/\eta)} + \omega\eta\rho_0 E \quad (3)$$

式中: p_T 为爆轰产物压力, η 为爆轰产物与初始炸药密度 ρ_0 的比值, $\rho_0=1\ 630\ \text{kg/m}^3$; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为状态方程参数, $A=371.2\ \text{GPa}$ 、 $B=3.231\ \text{GPa}$ 、 $R_1=4.15$ 、 $R_2=0.95$ 、 $\omega=0.3$; E 为爆轰产物内能, $E=8.0\ \text{GJ/kg}$ 。

1.2 计算结果与实验结果对比

图 2 为 4 g PETN 混合炸药在位于水下 0.26 m、距离刚性壁面 0.19 m 爆炸时, 气泡的实验结果^[13]与计算结果, 刚性壁面位于气泡的右侧。

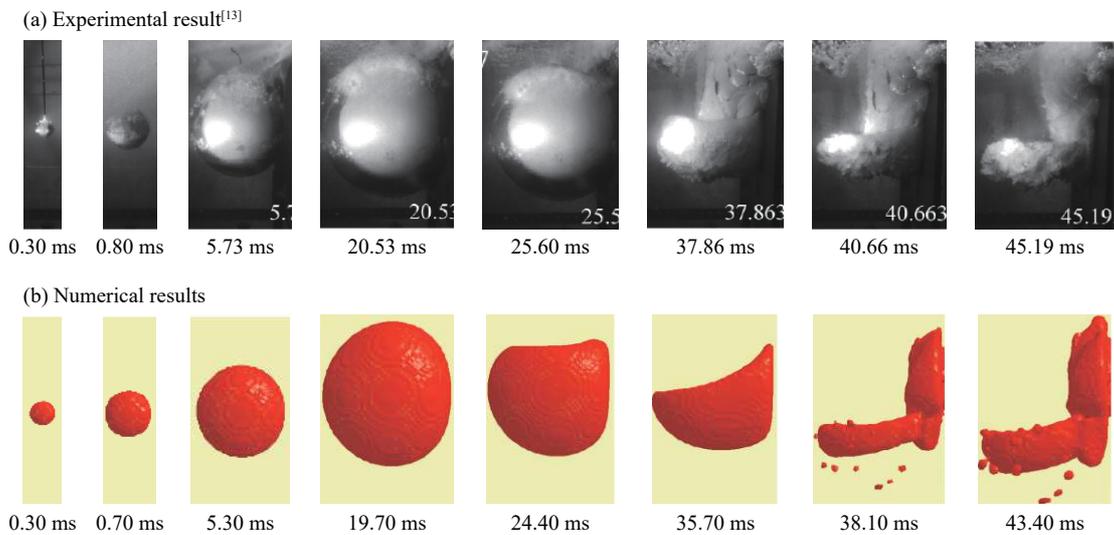


图 2 混合边界条件时爆炸气泡实验结果与计算结果对比

Fig. 2 Experimental and numerical results of bubble in complex boundary conditions

通过比较实验结果和数值结果, 发现两者在气泡形态以及产生相应形态所对应的时刻具有高度的一致性, 由此可以认为本次使用的 ALE 方法能够较好地模拟近水面近壁面混合边界条件下, 爆炸气泡的膨胀、收缩、射流、溃灭等复杂现象, 可以进行下一步更深层次的工作。

2 计算模型及工况设置

2.1 平台有限元模型

按照美国中型平台尺寸建立有限元模型^[14], 长 12.2 m、宽 6.1 m、总高度 4.2 m、双层底高 1 m, 双层底之间通过纵桁和实肋板加强, 空载吃水 1.2 m, 空载重心高 1.01 m。在保证主尺寸、重心、吃水量等影响摇荡性能的参数不变前提下对模型进行部分简化。王军等^[11]发现刚体运动能量约占整个外来能量的 60%~70% 以上, 平台工作时, 刚体运动占绝大部分。同时由于气泡脉动以及后期水冢落水产生波浪的时间较长, 为缩短计算时间, 本文将平台材料简化为刚体进行探究。具体结构示意图如图 3 所示。

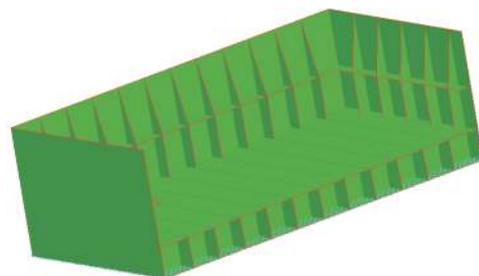


图 3 平台有限元模型

Fig. 3 Finite element model of floating shock platform

2.2 工况设置

平台有限元模型引用美军标的设计标准,因此实验时同样采用美军标相对应的工况进行计算。为提高安全标准,将原标准中 40.8 kg HBX-1 炸药换成 60 kg TNT 球形炸药进行考核。并参照美军标的设计要求,选择距离自由液面垂向距离为 8.23 m,沿平台宽度方向设置多个水平爆点,具体示意图如图 4(a)~(b)所示,工况参数如表 1 所示。本文中基于平面波假定,从结构遮挡的冲击波能量相等角度定义无量纲冲击因子 C ,具体计算如下:

$$C = \frac{\sqrt{W}}{R} \tag{4}$$

式中: W 为炸药当量, kg; R 为总爆距, m。

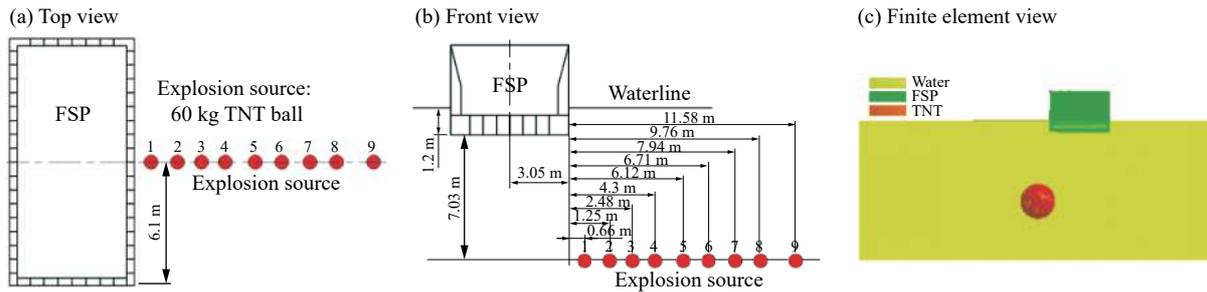


图 4 不同水平距离工况示意图

Fig. 4 Illustration of working conditions at different horizontal dimensionless distances

表 1 不同水平距离工况布置情况

Table 1 Layout of working conditions at different horizontal dimensionless distances

工况编号	炸药当量/kg	水平爆距/m	竖直爆距/m	爆距/m	冲击因子 C
工况1	60	0.66	7.03	7.06	1.10
工况2	60	1.25	7.03	7.14	1.08
工况3	60	2.48	7.03	7.45	1.04
工况4	60	4.30	7.03	8.24	0.94
工况5	60	6.12	7.03	9.32	0.83
工况6	60	6.71	7.03	9.72	0.80
工况7	60	7.94	7.03	10.60	0.73
工况8	60	9.76	7.03	12.03	0.64
工况9	60	11.58	7.03	13.55	0.57

3 数值计算结果分析

3.1 平台运动形态变化

图 5 为工况 2 的自由面和平台运动图,此工况下爆距较近。可以看出,在图 5(a)到图 5(b)过程中,气泡一直膨胀,并推动平台发生顺时针横摇运动,最大横摇角约 3° 。在 $t=0.340$ s (图 5(b))时刻气泡体积膨胀到最大值,同时由于边界条件的不连续性,平台附近流场出现高压区,在平台两侧出现自由面突起。同时气泡内压远小于周围流体,周围流体受到辐射的负压,因为平台的存在,此负压从气泡一直延伸到平台的下表面,故在气泡收缩过程中,自由面突起与平台交界点之间的自由面迅速向内凹陷,产生空腔,使得平台左侧失去浮力的支撑作用,从而产生逆时针的恢复力矩,平台开始向左下方运动,横摇角度减小。直到 $t=0.640$ s (图 5(c))时刻气泡体积达到最小值,气泡第一周期结束,进入第二周期并再次开始膨胀,并出现明显的上浮运动,平台再次向右上方移动。在 $t=1.010$ s (图 5(d))时气泡体积膨胀到最大,

由于气泡与平台之间距离过近, 平台阻止了气泡的完全膨胀, 同时气泡也推动平台, 使平台开始发生大角度的顺时针横摇运动, 此时平台横摇角达到 12.3° , 下一时刻平台开始随着气泡的收缩而做逆时针运动, 自由面突起由于惯性继续上升。在 $t=1.240\text{ s}$ (图 5(e)) 时, 气泡缩小到最小, 开始下一周期的膨胀, 平台横摇角继续增加。在 $t=1.520\text{ s}$ (图 5(f)) 时, 气泡体积第三次膨胀到最大, 并已经开始产生皇冠围裙, 此后水冢开始向周围及上方扩散, 由于滞后流以及上升水冢的作用, 平台一直发生大角度的横摇运动, 直到 $t=2.320\text{ s}$ (图 5(h)) 达到最大值, 此时横摇角度已达到 40° , 严重威胁平台的稳性, 此时气泡已经破碎, 后续讨论将气泡移除。由于下落的水冢直接抨击平台左侧底部, 对平台重心产生逆时针的力矩作用, 平台发生逆时针运动, 横摇角开始减小, 同时部分水冢落在自由面上, 自由面产生孤波向右传播。推动平台一直向右平移移动。在 $t=3.620\text{ s}$ (图 5(j)) 时刻, 平台重心回复到平衡位置, 同时由于惯性作用及自由面波浪的作用, 平台继续进行逆时针运动。在 $t=4.350\text{ s}$ (图 5(k)) 时刻, 横摇角达到最大(约 7°), 此时波浪已经很小, 此后平台由于波浪的作用和惯性开始发生向右平移和小角度的往复横摇运动。

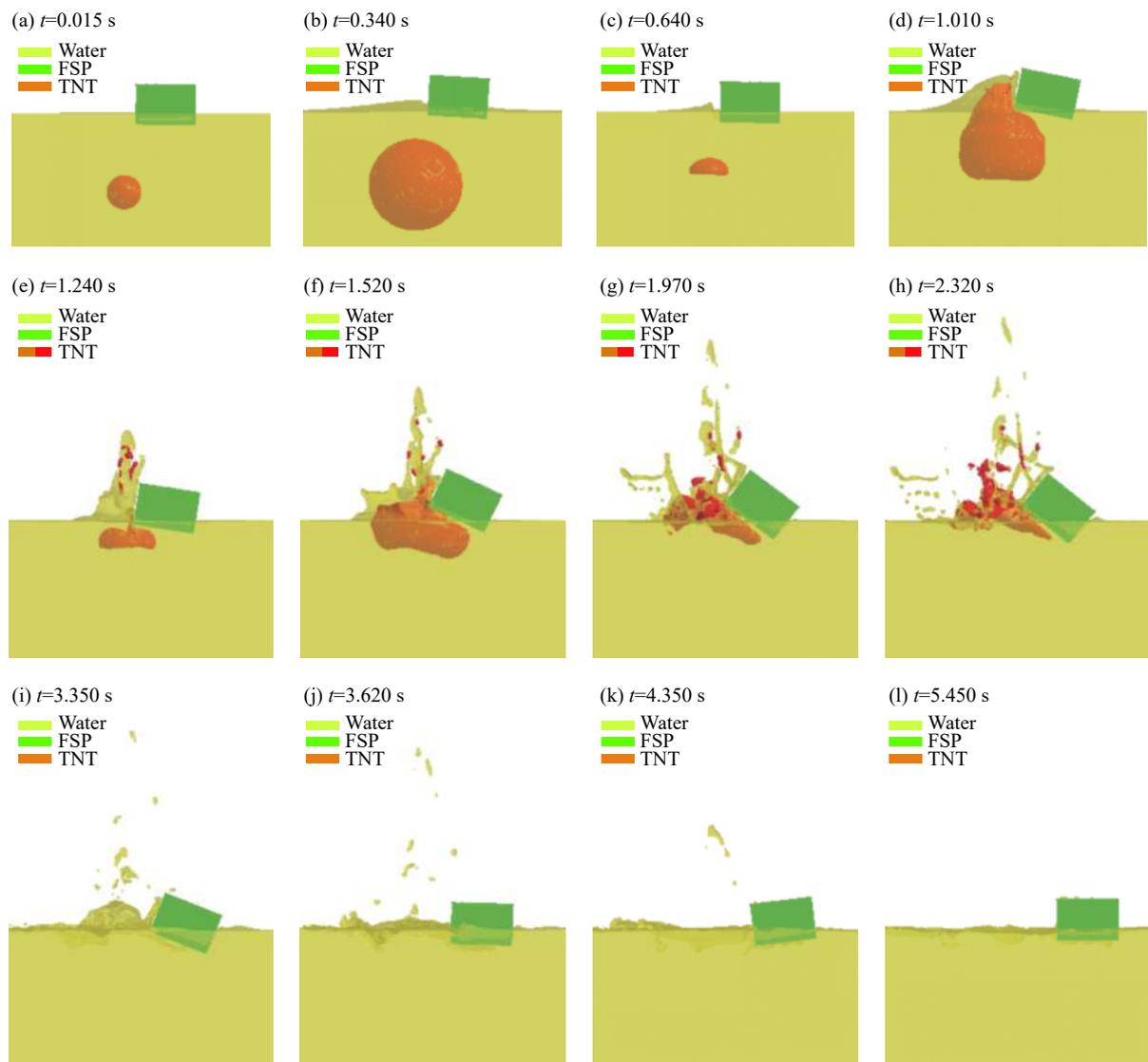


图 5 工况 2 水冢形态演变及平台运动响应

Fig. 5 Water spike's shape and evolution process and platform's motion response in working condition 2

图 6 为工况 6 的自由面和平台运动图, 此工况下爆距较远。图 6(a)~(f) 时, 在整个上浮气泡脉动过程中, 平台受到水冢的作用力很小, 运动响应较小。平台未对气泡运动特性及水冢演变特征产生影响。

在图 6(g) 时气泡开始破碎产生兴波, 中心水柱在惯性作用下继续上升, 皇冠围裙则继续向四周飞溅, 并推动平台产生顺时针的横摇运动。在图 6(h) 时可以看到部分水冢由于重力已经开始下落并抨击水面, 产生向两侧扩散的孤立波, 平台由于波浪作用继续进行顺时针横摇运动。在图 6(i) 时, 整个皇冠围裙已经全部落入水中, 中心水柱也已开始下落, 平台横摇角达到最大值(约 5°), 此时平台由于恢复力矩开始做逆时针横摇运动, 并且平台上方水冢落下拍击平台上表面。在图 6(j) 时平台逆时针横摇达到最大值, 由于始终有孤立波的作用, 此时横摇角为 -0.35° , 由于波浪及恢复力矩, 平台继续做顺时针横摇运动, 并且此时发现水冢已经完全融入水面, 平台上表面水花开始向上飞落。在图 6(k) 时发现, 水面由于水冢的抨击作用, 产生大量水花, 平台上表面水花飞溅得更加剧烈, 此时, 平台横摇角达到最大值(约 5°)。由于波浪和回复力矩的作用, 平台开始不断进行小角度有阻尼的升沉运动和横摇运动。

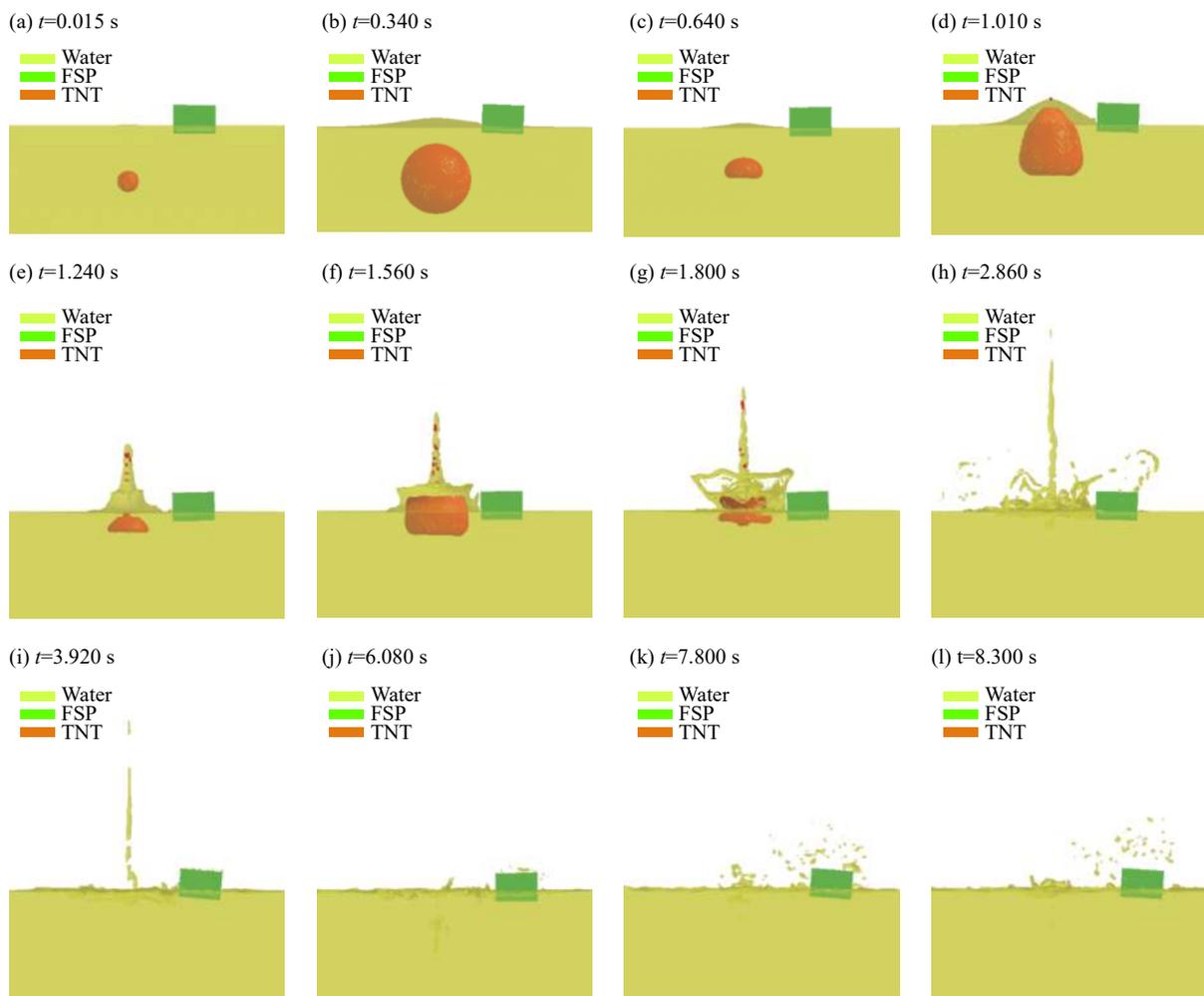


图 6 工况 6 水冢形态演变及平台运动响应

Fig. 6 Water spike's shape and evolution process and platform's motion response in working condition 6

3.2 平台三自由度刚性位移

下面给出不同水平距离下平台的三自由度曲线, 升沉自由度曲线如图 7 所示。

由图 7 可以发现, 在上浮气泡脉动阶段, 由于气泡脉动载荷基本是以水中声速(约 $1\ 500\text{ m/s}$)向外传播, 平台上升位移最大与最小值时刻严格对应气泡体积最大与最小值时刻, 无明显的延迟现象。同时发现升沉运动位移随着水平位移的增大而减小。这是由于随着水平位移变远, 总的气泡作用力减小, 同时用于抬升平台的分作用力也减小。后期当气泡破碎以及自由面水柱跌落阶段, 可以发现仍然是升沉运动位移随着水平位移的增大而减小, 而对应最大值的时刻越早。这是因为平台上升到最大值后, 由于重

力作用, 势能转化为动能再转化为势能, 上升阶段距离近的势能大, 所以后期转化的势能大。距离变远时能量总量较小, 能量相互转化完成所需时间较短, 使得对应最大值的时刻较早。同时也说明在爆炸后期气泡破碎以及自由面水柱跌落形成的兴波, 对平台升沉作用影响不大。

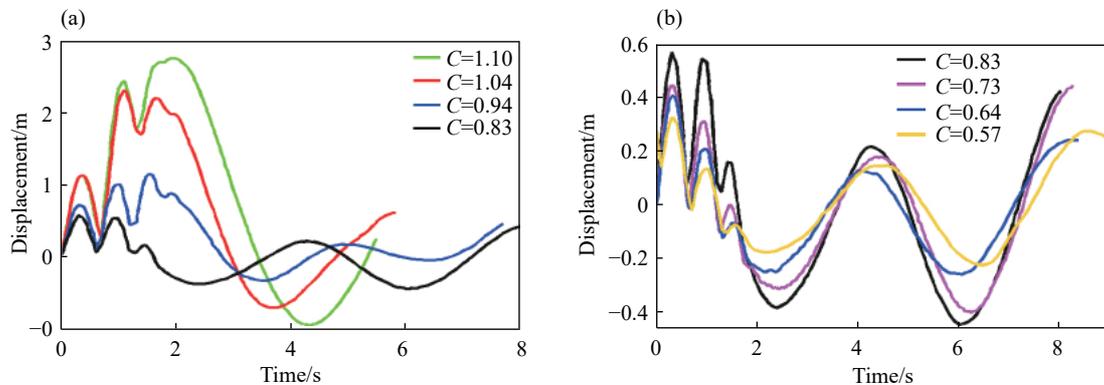


图 7 不同水平位移下平台升沉运动响应

Fig. 7 Platform's heave motion response in different horizontal displacements

由图 8 中可以看出, 在上浮气泡脉动阶段, 在 $C=1.04$ 和 $C=0.94$ 两个工况下第二次气泡膨胀时平台的横摇角特别大, 达到 40° , 已经丧失安全性和使用性。由图 5 对应时刻可以看出, 此时气泡在自由面附近直接膨胀, 产生的皇冠水冢围裙直接作用到平台左侧底部, 推动平台一直发生大角度的横摇运动。而距离更近的工况由于力臂太小, 使横摇力矩很小, 基本只造成升沉运动。距离太远则由于力太小, 使得横摇力矩很小, 造成小角度的横摇运动。同时发现在气泡破碎以及自由面水柱跌落阶段, 距离较近时对平台的影响仅为由于惯性引起的横摇角相对较小的来回摆动。而距离变大时, 横摇角是先增大后减小。原因为当距离特别近时, 本应该用于兴波的大部分能量在气泡脉动阶段直接造成平台抬升和横摇, 转化为了平台的动能, 从而减弱了后期波浪的能量。由图 5 的对应时刻可以看出, 距离较近时, 水冢落水时有很大一部分直接砸落在平台上表面上, 造成的更多的是升沉运动, 而抨击水面产生的兴波和气泡破碎产生的兴波也由于距离过近, 并未发展完全; 在最后阶段, 平台抬升使得干舷明显增加, 此时波浪的抨击作用在平台左侧的面积较大, 波浪的能量更多地转化为横倾运动, 而不是横摇。而当距离较大时, 横摇角是先增大后减小, 而且可能第二个横摇角最大值略大于第一个横摇角最大值。这是因为波浪作用具有一个从无到有的发展区间, 而且水冢落水主要分成两部份, 一部份是皇冠围裙落水较早且距离较近, 另一部份是中心水柱落水, 时间较晚距离相对较远, 两者在自由面上产生的波浪有一个叠加作用。

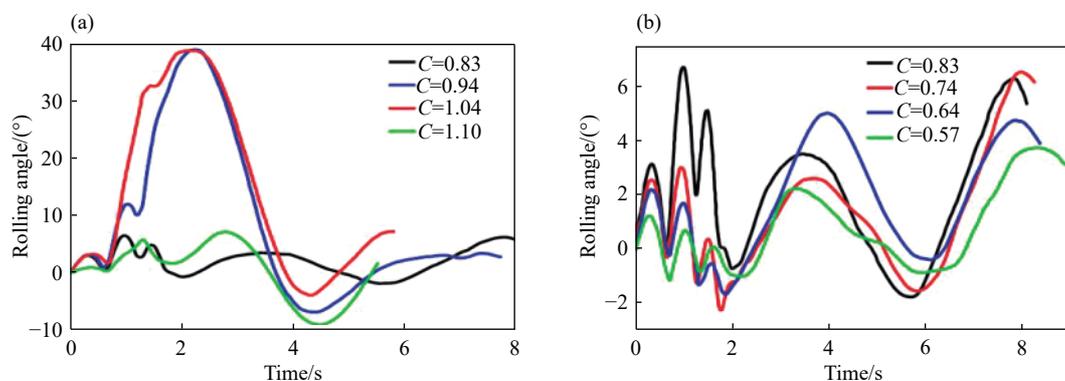


图 8 不同水平位移下平台横摇运动响应

Fig. 8 Platform's roll motion response in different horizontal displacements

由图 9 可以发现,在前期的气泡上浮阶段,各工况下引起的横荡位移值相差很小,这说明横荡位移主要是由后期气泡破碎兴波及水冢抨击水所产生的波浪对平台进行冲击引起的。工况 1 后期横荡发生很小主要是因为:由于爆距较近,此时气泡能量几乎完全使平台进行升沉运动,对平台横荡运动的贡献不大。而剩余工况随着水平距离增大,横荡位移变化较慢。这是因为波浪的产生及其对浮动的作用不是瞬间完成的,需要一定的传播时间。距离较近,波浪作用的时间较早,故横荡位移在相同的时间内变化较为明显。继续计算使横摇第二次达到最大值,此刻波浪作用极为有限,并且由中心水柱产生的波浪也已经作用到平台上或仍在传播,且由于能量损失造成波高已经很小,仅对平台造成横荡运动,对安全性和使用性不会有影响。

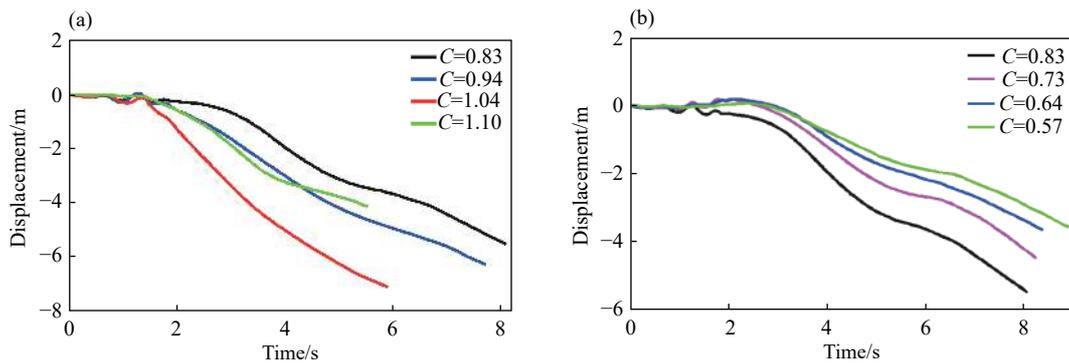


图 9 不同水平位移下平台横荡运动响应探究

Fig. 9 Platform's traverse motion response in different horizontal displacements

3.3 平台冲击响应变化

对于固定系统,当不同激励作用时,造成系统的冲击环境不同,而整个平台考察设备过程中,平台承受的外界激励种类较多,为此本节分别进行冲击波仅峰值作用(作用时间 0.05 s)、冲击波完全作用(作用时间 0.5 s)、冲击波气泡脉动作用(作用时间 2 s)、冲击波气泡脉动与后期波浪共同作用(作用时间 7.5 s)总计 4 种情况的计算,以探讨气泡及其破碎兴波对平台冲击影响。工况 2 在 4 种情况下的冲击加速度时历曲线如图 10 所示。并分别画出各激励载荷作用下,较近爆距工况 2 和较远爆距工况 6 冲击响应谱曲线对比。

从图 11 可以发现,当仅冲击波峰值对平台作用时,此时处于冲击波初始响应阶段,由于外界激励比较简单,作用时间较短(此时作用时间 0.05 s,只有大于 20 Hz 的频率值才达到完整一个周期,5~20 Hz 时达到 1/4 周期以上,更低频不可能达到峰值),低频段此时出现明显的等位移谱、等速度谱、等加速度谱。当冲击波完全作用时,对比发现,此时等速度谱与等加速度谱几乎不变,等位移谱值在较低频时增加,这是因为冲击波完全作用时,时间较长,达到 0.5 s,此时 2 Hz 以内的频率值都已达到完整一个周期,0.5~2 Hz 值也已达到 1/4 周期以上,故此时外界激励基本涵盖峰值段,等位移谱值在较低频时增加。

从图 12 可知,当有无气泡脉动作用时,工况 2 与工况 6 两者的高频部分几乎不变,即谱加速度值不变,而在低频中频部分则出现较多共振点,且爆距较近的工况 2 数值影响程度更大,这说明气泡脉动作用与水冢直接冲击作用对冲击谱值影响主要是中低频性,影响谱速度值、谱位移值,对谱加速度值没有影响。从图 13 可以发现,在考虑波浪作用的影响时,工况 2 与工况 6 两者各自有无波浪的原始谱基本完全相同,仅在 8 Hz 处有明显突起,也就是有一个周期 0.125 s 左右的外载荷激励。图 14 为波浪作用下平台加速度的时历曲线。观察图 14 发现波浪周期约为 0.12 s,此激励正是后期波浪造成的,即水冢抨击水面和气泡兴波对平台形成周期性的激励,而且只是通过在此激励对应频率而引起共振来改变冲击环境。

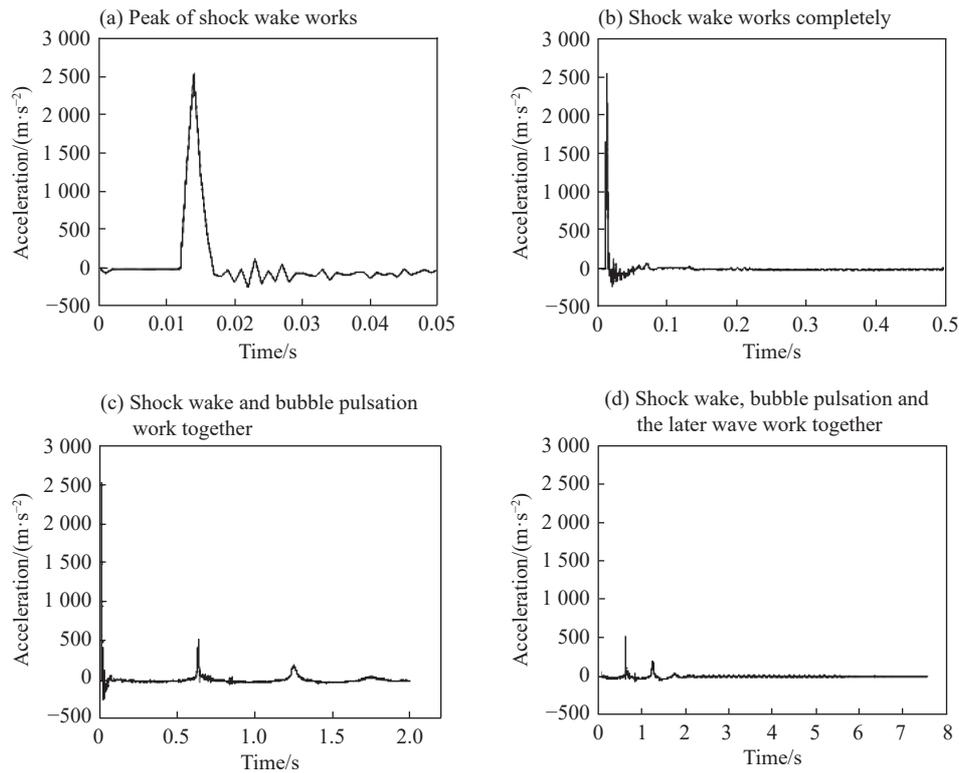


图 10 工况 2 冲击加速度时历曲线

Fig. 10 Shock acceleration time history curve of working condition 2

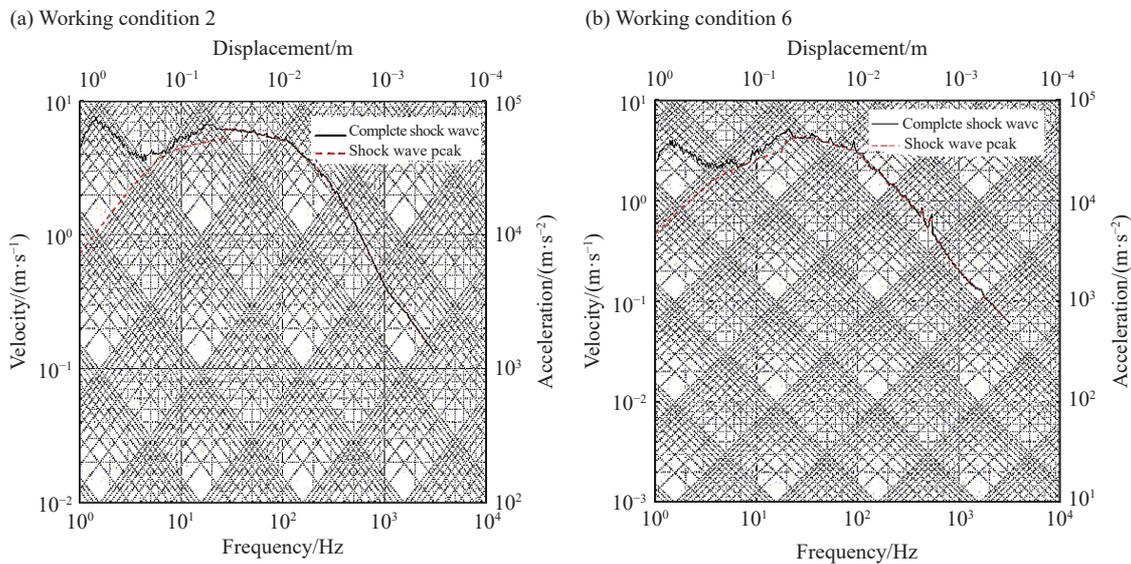


图 11 冲击波作用时间对冲击响应谱影响对比图

Fig. 11 Effect of shock wave's action time on shock spectrum in comparison

图 15 为其他工况有无波浪的冲击谱计算结果, 当冲击因子小于 1 时, 谱速度和谱加速度的变化较缓, 几乎是一条直线, 而大于 1 之后则急速上升, 可发现是因为距离过近时, 水冢直接推动平台引起的。可发现考虑气泡后期波浪对整个计算结果的结果极为有限, 故在后期计算不同冲击因子对平台冲击的响应结果时, 为了节省计算时间和计算成本, 只计算到气泡脉动载荷截止即可。将忽略气泡破碎兴波和波浪影响的平台在不同冲击因子 C 下谱速度和谱加速度曲线拟合成公式, 如下表 2 所示, 方便以后的直接应用。

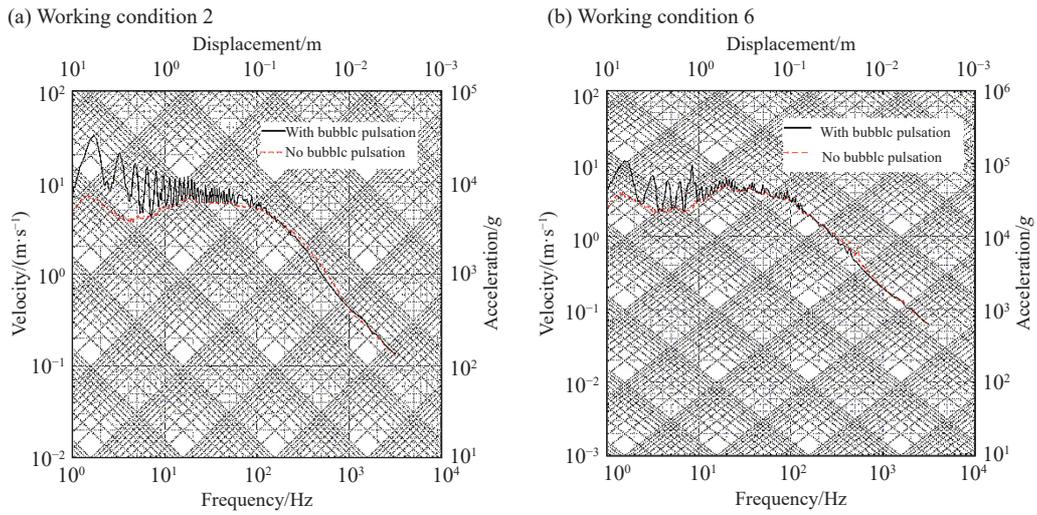


图 12 气泡脉动对冲击响应谱影响对比图

Fig. 12 Effect of bubble pulsation on shock spectrum in comparison

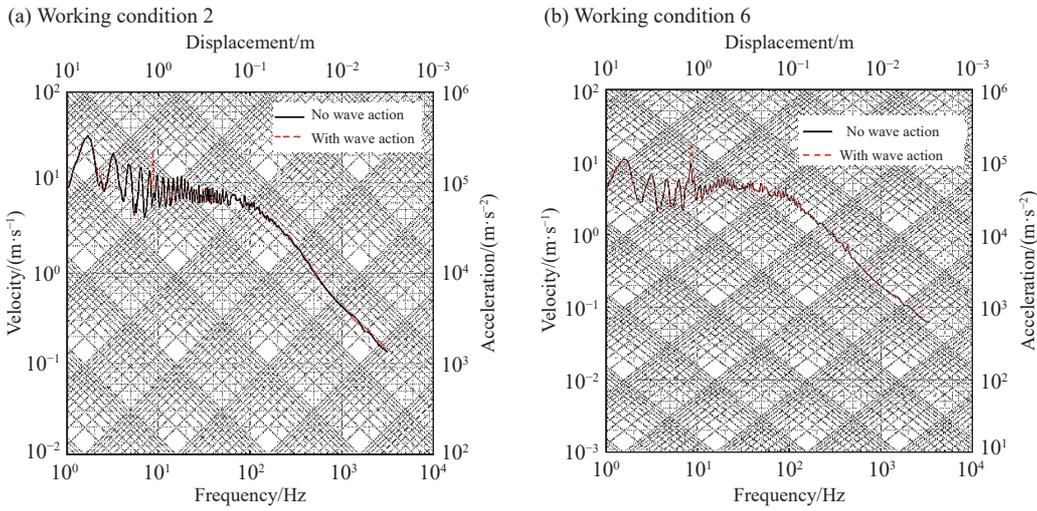


图 13 后期波浪对冲击响应谱影响对比图

Fig. 13 Effect of later wave on shock spectrum in comparison

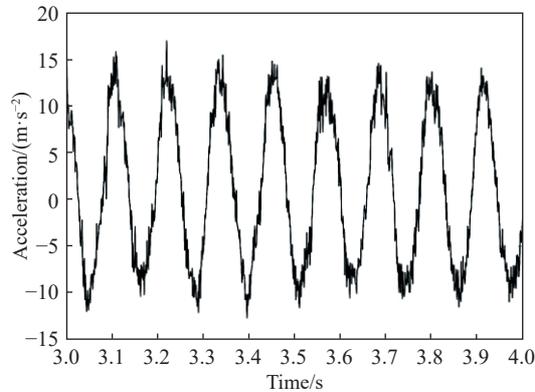


图 14 波浪作用对平台加速度响应影响图

Fig. 14 Later wave's effect on shock acceleration response time

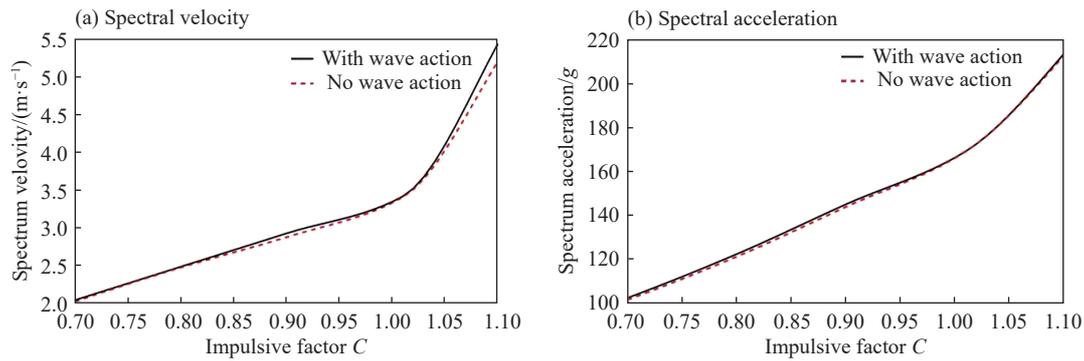


图 15 波浪对比时冲击谱参数随冲击因子变化关系

Fig. 15 Relationship between shock spectrum parameters and shock factor in wave contrast

表 2 冲击环境参数与冲击因子关系式

Table 2 Relationship between shock response spectrum parameters and shock factor

冲击环境参数	近似拟合曲线方程	
谱速度(Y_1)	$Y_1=4.1394C-0.8298 (0.4<C<1.0)$	$Y_1=18.6312C-15.4100 (1.0<C<1.1)$
谱加速度(Y_2)	$Y_2=221.35C-55.069 (0.4<C<1.0)$	$Y_2=502.28C-341.02 (1.0<C<1.1)$

4 结 论

本文利用 LS-DYNA 软件模拟整个气泡、自由面、浮动冲击平台的耦合过程, 考虑气泡脉动及其破碎兴波、水冢、涌流等作用, 探讨水下爆炸过程中浮动冲击平台运动变化与冲击环境变化情况, 得到以下结论: (1) 在整个水下爆炸过程中, 气泡、自由面、浮动冲击平台会发生强烈的耦合作用, 爆炸气泡破碎前后遵循不同规律: 气泡破碎前, 浮动冲击平台的刚性位移主要与气泡脉动力、水冢直接推动有关, 主要引起浮动冲击平台的横摇运动和升沉运动。气泡破碎后, 浮动冲击平台的刚性位移由气泡破碎兴波和水冢拍击水面产生的孤立波引起, 主要造成浮动冲击平台的横摇运动和横荡运动, 影响浮动冲击平台的安全性和使用性。(2) 在水下爆炸过程中, 冲击波是影响舰船冲击环境的主要因素, 由于气泡的低频性, 气泡脉动及水冢对浮动冲击平台直接冲击作用小幅度增加谱速度值、谱位移值, 对谱加速度值几乎无影响。(3) 水冢拍击水面和气泡兴波形成的波浪, 对浮动冲击平台造成的激励载荷呈周期性, 而且只是通过在此激励对应频率引起共振来改变冲击环境, 且由于波浪载荷很小, 对冲击环境影响较小, 在计算时可以忽略不计。

参考文献:

[1] 周其新. 舰载设备冲击动力学数值实验技术体系研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.

[2] 宫国田, 金辉, 张妹红, 等. 国外舰艇抗水下爆炸研究综述 [C] // 第九届全国冲击动力学学术会议. 河南焦作, 2009.

[3] 王军. 浮动冲击平台冲击动力特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.

[4] KEIL A H. The response of ships to underwater explosions [J]. Transactions-Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2010, 69: 43.

[5] KLASEBOER E, KHOO B C, HUNG K C. Dynamics of an oscillating bubble near a floating structure [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2005, 21(4): 395–412. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2005.08.006.

[6] ZHANG A M, ZENG L Y, CHENG X D, et al. The evaluation method of total damage to ship in underwater explosion [J]. *Applied Ocean Research*, 2011, 33(4): 240–251. DOI: 10.1016/j.apor.2011.06.002.

[7] ZHANG N, ZONG Z. The effect of rigid-body motions on the whipping response of a ship hull subjected to an underwater bubble [J]. *Journal of Fluids & Structures*, 2011, 27(8): 1326–1336.

[8] 沈国光, 李德筠, 李润珊, 等. 大当量爆炸兴波的数值模拟 [J]. 海洋学报, 1996, 18(5): 128–133.

SHEN Guoguang, LI Deyun, LI Runshan. Numerical simulation of large equivalent detonation wave [J]. *Acta Oceanica*

- Sinica, 1996, 18(5): 128–133.
- [9] 李汪玮, 宗智, 孙雷. 水下爆炸兴波及其对结构物作用问题的数值模拟 [J]. 水动力学研究与进展: A辑, 2010, 25(6): 792–805.
LI Wanghui, ZONG Zhi, SUN Lei. Numerical simulation of underwater explosion and wave propagation and its effect on structures [J]. Journal of Hydrodynamics: A, 2010, 25(6): 792–805.
- [10] WANG Q. The bursting of an underwater explosion bubble at a free surface [J]. *Ocean Engineering*, 2015, 109: 611–622. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.09.017.
- [11] 王军, 郭君, 姚熊亮. 冲击波作用下浮动冲击平台的刚体响应分析 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015(2): 71–75.
WANG Jun, GUO Jun, YAO Xiongliang. Rigid body response analysis of a floating shock platform under shock wave [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2015(2): 71–75.
- [12] 郑长允, 赵鹏远, 赵红光, 等. 设备缓冲平台在水下爆炸载荷作用下冲击响应分析 [J]. *科技导报*, 2012, 30(18): 37–40. DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.18.004.
ZHENG Changyun, ZHAO Pengyuan, ZHAO Hongguang, et al. Shock response analysis of equipment buffer platform under underwater explosion loading [J]. *Science & Technology Review*, 2012, 30(18): 37–40. DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.18.004.
- [13] CUI P, ZHANG A M, WANG S P. Small-charge underwater explosion bubble experiments under various boundary conditions [J]. *Physics of Fluids*, 2016, 28(11): 283.
- [14] 王军, 姚熊亮, 杨棣. 浮动冲击平台冲击环境对设备响应的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(2): 236–242. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)02-0236-07.
WANG Jun, YAO Xiongliang, YANG Di. Shock of shock platform on the response of equipment to [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(2): 236–242. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)02-0236-07.

Influence of bubbles and breaking waves on floating shock platform

WANG Zhikai¹, ZHOU Peng², SUN Bo¹, YAO Xiongliang¹, YANG Nana¹

(1. School of Marine Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China)

Abstract: Based on the ALE algorithm in LS-DYNA software, the numerical simulation of the pulsation process of underwater explosion near water surface is carried out and compared with the experimental results. The correctness of the finite element model and parameter setting of the near-wall hybrid boundary near the water surface is verified. The different explosion conditions are set up, and the influence of air bubbles and their broken waves on the floating shock platform is explored. The results show that during the underwater explosion, the bubble, free surface and floating shock platform will have strong coupling effect, in the bubble pulsation stage. The bubble will induce the inrush current and the water ripple effect, affecting the safety and usability of the floating shock platform; the shock wave is the main factor affecting the shock environment of the floating shock platform. Due to the low frequency of the bubble, the bubble pulsation and the water ripple on the floating shock platform. The direct shock effect will increase the spectral velocity value and spectral displacement value of the shock environment of the floating shock platform to a small extent, and has almost no effect on the spectral acceleration value; the waves and bubbles formed by the water slamming water surface are broken and waved, which is caused by the floating shock platform. The excitation load is periodic with the same period as the wave period. The excitation load of the wave changes the shock environment of the platform only by exciting the floating shock platform resonance of its corresponding frequency. The wave load is small and has little shock on the shock environment of the floating shock platform.

Keywords: bubble pulsation; floating shock platform; shock environment; underwater explosion

(责任编辑 曾月蓉)