

高压物理学报

刚性柱附近浅水爆炸荷载特性研究

刘靖晗 唐廷 韦灼彬 于小存 李凌锋 张元豪

Pressure Characteristics of Shallow Water Explosion near the Rigid Column

LIU Jinghan, TANG Ting, WEI Zhuobin, YU Xiaocun, LI Lingfeng, ZHANG Yuanhao

引用本文:

刘靖晗, 唐廷, 韦灼彬, 等. 刚性柱附近浅水爆炸荷载特性研究[J]. 高压物理学报, 2019, 33(5):055104. DOI: 10.11858/gywlb.20180704

LIU Jinghan, TANG Ting, WEI Zhuobin, et al. Pressure Characteristics of Shallow Water Explosion near the Rigid Column[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(5):055104. DOI: 10.11858/gywlb.20180704

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180704>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

爆炸深度对浅水爆炸气泡脉动的影响

Influence of Explosion Depth on Bubble Pulsation in Shallow Water Explosion

高压物理学报. 2018, 32(2): 024102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20170580>

距离参数对浅水中气泡运动影响规律的实验和数值模拟

Experimental and Numerical Simulation Study on the Influence of Distance Parameter on Bubble Motion in Shallow Water

高压物理学报. 2018, 32(6): 065103 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180583>

港池环境近水面水下爆炸特性及其毁伤效应

Loading Characteristics and Damage Effect of Near-Surface Underwater Explosion in Harbor Basin

高压物理学报. 2019, 33(4): 045103 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180638>

气相流约束调控微细水射流的数值仿真

Numerical Simulation of High Pressure Micro Water Jet Modulation with the Constraint of Gas Flow

高压物理学报. 2017, 31(5): 585 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.05.012>

刚性柱附近浅水爆炸荷载特性研究

刘靖晗^{1,2}, 唐 廷², 韦灼彬², 于小存³, 李凌锋^{1,2}, 张元豪^{1,2}

(1. 海军工程大学, 湖北 武汉 430033;

2. 海军勤务学院, 天津 300450;

3. 联勤保障部队第四工程代建管理办公室, 辽宁 沈阳 110005)

摘要: 刚性柱附近浅水爆炸时冲击波传播、气泡射流受多种因素影响。考虑水面、水底、刚性柱与水下爆炸冲击波及气泡的耦合作用, 基于 LS-DYNA 有限元软件, 建立浅水爆炸全耦合模型, 通过经验公式验证有限元模型的正确性。研究表明: 采用炸药直径 $1/3 \sim 1/2$ 中心渐变网格能够较好地保证数值模拟精度。在冲击波传播阶段, 刚性柱迎爆区冲击波峰值上升并产生切断现象, 冲击波下降段被“截断”, 而背爆区冲击波峰值衰减约 50%, 同时正压作用时间增加; 在气泡脉动阶段, 气泡在收缩阶段产生指向刚性柱的气泡射流, 当刚性柱与炸药之间的距离约为一个气泡半径时, 刚性柱附近的脉冲荷载增幅最大, 脉冲荷载最大测点水深较爆心上移。

关键词: 浅水爆炸; 刚性柱; 切断现象; 射流; 数值模拟

中图分类号: O383

文献标识码: A

在水下爆炸过程中, 边界条件对冲击波传播和气泡脉动的影响很大。高勇军^[1]、顾文彬^[2-3]等先后通过浅水爆炸试验和数值仿真方法研究了浅水环境中水下冲击波形成和传播过程, 系统分析了自由面和水底界面对气泡脉动和冲击波传播的影响, 发现了水面和水底反射稀疏波的切断效应。韦灼彬等^[4]采用数值仿真软件模拟港口水下爆炸冲击波的传播过程, 在考虑水面和水底影响的情况下, 分析冲击波和气泡脉动沿港池水深的变化规律, 发现浅水环境流场边界复杂, 不仅包含水面、水底边界, 还包含码头、桥梁等刚性边界。方斌^[5-6]、牟金磊^[7-8]、朱锡^[9]等以气泡脉动为重点, 分别研究水平、垂直刚性壁面以及船型梁附近气泡的脉动运动, 得到了气泡脉动解析解和射流规律, 张阿漫等^[10-11]考虑自由面、刚性边界等约束对水下爆炸气泡脉动的影响, 利用边界元法模拟近边界水下爆炸, 建立了气泡、壁面和自由面三者之间的耦合动力学模型。国外学者 Benjamin 等^[12]通过高速摄影技术, 首次拍摄了刚性界面附近的气泡射流现象。Rajendran 等^[13-14]进行了一系列钢板附近水下爆炸试验, 研究不同爆距条件下钢板的响应及破坏现象。Hung 等^[15]进行了复杂边界下小当量水下爆炸试验, 观察到近水面、刚性壁、弹性壁附近气泡的运动特征。Wardlaw 等^[16]考虑弹性、刚性界面等边界因素, 分析了冲击波反射、气穴效应、气泡脉动以及二次荷载等现象, 发现刚性界面会加大气泡和冲击波荷载, 从而促进气穴效应和毁伤效应。从上述研究中可以看出, 刚性界面对冲击波传播和气泡脉动均有较大影响, 已有工作主要集中在刚性壁边界, 对高桩码头、桥梁等透空式结构开展刚性柱附近浅水爆炸荷载特性研究具有一定意义。

本研究考虑水面、水底、刚性柱边界影响, 通过 LS-DYNA 有限元软件对浅水爆炸荷载传播问题进

* 收稿日期: 2018-12-20; 修回日期: 2019-02-25

基金项目: 军队后勤科研计划项目(CHJ13J006)

作者简介: 刘靖晗(1992—), 男, 博士研究生, 主要从事港口工程、防护工程研究。

E-mail: 1226001717@qq.com

通信作者: 唐 廷(1980—), 男, 博士, 讲师, 主要从事港口工程、防护工程研究。

E-mail: tangting1980@126.com

行分析,与经验公式对比验证数值仿真的准确性,得到冲击波传播过程和气泡射流现象,总结刚性柱附近冲击波及气泡脉冲荷载特性,为进一步开展复杂边界条件下水下爆炸毁伤效应研究打下基础。

1 数值模型

1.1 有限元模型

通过有限元软件 LS-DYNA 模拟浅水爆炸,设水下深度为 20 m,空气域高度为 5 m,水底黏土厚度为 5 m,100 kg TNT 球形装药在距水面 10 m 深处,模型尺寸为 30 m×30 m×20 m,有限元模型如图 1 所示。其中空气、水、炸药采用欧拉单元,黏土采用拉格朗日单元,黏土区域重叠空白材料(Mat_Ale_Vacuum),流域边界采用环境单元(Eulerian Ambient),保证四周无边界约束,并初始化重力场和静水压力。

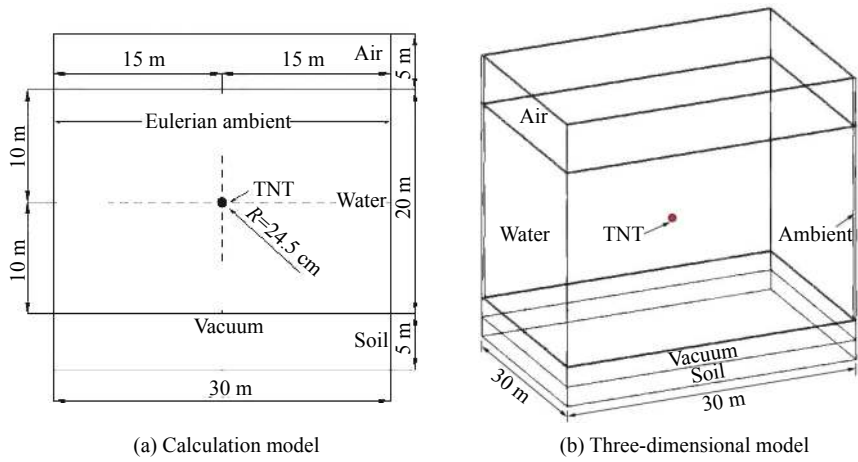


图 1 有限元计算模型
Fig. 1 FEM calculation model

假设空气、水、炸药均为均匀连续,空气采用线性多项式状态方程, $C_0\sim C_6$ 为状态方程参数, E 为初始单位质量内能;水采用 Grüneisen 状态方程, $C, S_1\sim S_3$ 为状态方程参数, γ 为 Grüneisen 常数;炸药采用标准 JWL 方程, A, B, ω, R_1, R_2 为状态方程参数;黏土采用线弹性模型, E 为弹性模量, G 为剪切模量,详细材料参数如表 1 所示。

表 1 有限元计算模型材料参数
Table 1 Material parameters of FEM calculation model

Material	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	C_0, C_1, C_2, C_3	C_4	C_5	C_6	$E/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$
Air	1.29	0	0.4	0.4	0	2.5×10^5
Material	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	C	S_1	S_2	S_3	γ
Water	1000	1480	2.56	-1.986	0.2268	0.5
Material	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	A/GPa	B/GPa	ω	R_1	R_2
TNT	1630	374	7.33	0.3	4.15	0.95
Material	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E/MPa	G/MPa			
Soil	1800	22.4	8			

1.2 网格尺寸的影响

考虑浅水爆炸水面、水底反射主要影响冲击波比冲量,冲击波峰值与无限水域冲击波荷载一致,基于大量试验得到水下爆炸冲击波峰值的经验公式^[17]

$$P_{\max} = 52.16 \left(\frac{W^{1/3}}{S} \right)^{1.13} \quad (1)$$

式中: $P_{\max}$ 为冲击波峰压, 单位 MPa; W 为炸药装量, 单位 kg; S 为测点距离, 单位 m。

有限元模拟的准确性与单元网格尺寸密切相关^[18-19], 选取炸药网格尺寸分别为 10、15、20 和 40 cm, 研究网格尺寸对仿真结果的影响。4 种网格尺寸数值仿真结果以及经验公式中冲击波峰值压力随测距变化规律见图 2。随着网格尺寸增加, 近场冲击波峰值压力减小明显, 而远场冲击波仅有略微减小, 冲击波衰减速度减缓, 这是由于网格较大时冲击波高频段损失所导致的。图 3 显示了 5 种网格尺寸的数值模拟结果与经验公式的相对偏差。冲击波峰值压力与经验公式计算结果的相对偏差随网格尺寸增加呈先减小后增大的趋势, 网格尺寸在 15~20 cm 范围内, 相对偏差较小, 但随测距变化而产生波动, 因此本数值仿真采用 15~20 cm 网格尺寸, 即 1/3~1/2 炸药直径的中心渐变网格, 所得仿真结果与经验公式计算结果的相对偏差随测距的变化在允许的误差范围之内, 从而确保数值仿真的准确性。

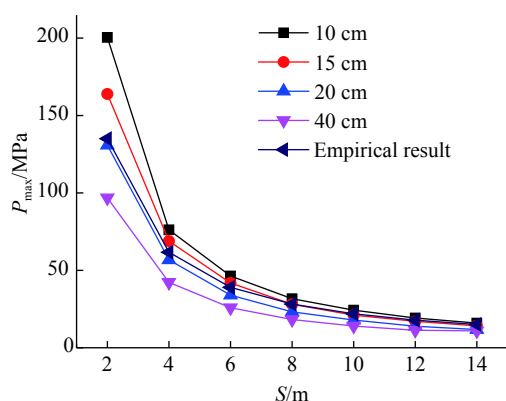


图 2 不同网格尺寸下的冲击波峰值压力

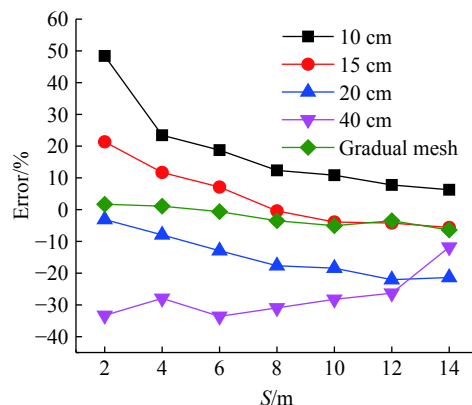


图 3 不同网格尺寸下冲击波峰值压力偏差

Fig. 2 Shock peak pressures simulated by different mesh sizes

Fig. 3 Error of shock peak pressures for different mesh sizes

2 数值模拟方法验证

自由水域水下爆炸时, 气泡膨胀最大半径 R_m 和气泡第一次脉动周期 T 的计算公式^[13] 为

$$R_m = 3.36 \left(\frac{W}{H+10} \right)^{1/3} \quad (2)$$

$$T = 2.08 \frac{W^{1/3}}{(H+10)^{5/6}} \quad (3)$$

式中: H 为水深, 单位 m; R_m 为气泡最大半径, 单位 m; T 为气泡第一次脉动周期, 单位 s。

表 2 为 100 kg TNT 炸药距水面 10 m 爆炸时气泡最大半径、第一次脉动周期、冲击波峰值压力的数值模拟结果与理论结果比较。气泡脉动和冲击波峰值压力的数值模拟结果与经验公式计算结果较为吻合, 在 $S=14$ m 时, 相对偏差最大为 6.42%, 说明数值仿真能清晰描述气泡脉动和冲击波荷载规律。

3 刚性柱附近浅水爆炸

3.1 刚性柱边界设定

针对浅水环境分别在距离炸药 2、5、10 m 处设置刚性柱, 建立基于任意拉格朗日欧拉法 (ALE) 的有限元模型, 如图 4 所示。系统中设立尺寸为 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的全约束刚性柱, 炸药装药量、刚性柱与炸药距离、刚性柱截面尺寸均为影响水下爆炸荷载结果的重要因素。为了统一变量, 定义无量纲比例距离为距离参数与气泡最大半径 R_m 的比值, 3 种工况下刚性柱与炸药的比例距离 d_e 分别为 0.39、0.98 和 1.95, 刚性柱截面的比例长度为 0.2。空气、水、空白物质采用多物质 ALE 算法, 土壤采用拉格

朗日算法,通过关键字*Constrained_Lagrange_in_Solid 定义流固耦合,模拟炸药、水、空气与刚性柱之间的流固耦合作用。

表 2 数值模拟与经验公式比较

Table 2 Comparison of the numerical and theoretical results

S/m	$P_{\max}$			R_m			T		
	Theoretical results/MPa	Numerical results/MPa	Error/%	Theoretical results/m	Numerical results/m	Error/%	Theoretical results/s	Numerical results/s	Error/%
2	135.05	137.36	1.71						
4	61.71	62.39	1.10						
6	39.03	38.78	0.63						
8	28.20	27.21	3.50	5.00	5.12	2.40	0.56	0.53	5.40
10	21.91	20.80	5.07						
12	16.78	17.21	3.49						
14	14.98	14.02	6.42						

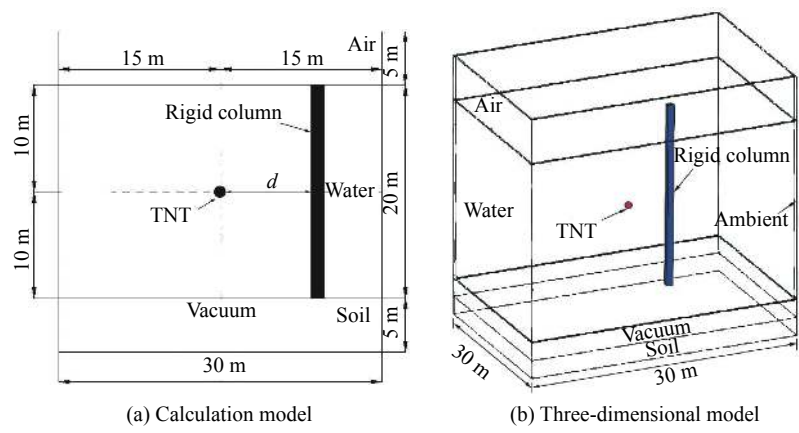


图 4 刚性柱有限元计算模型

Fig. 4 FEM calculation model of rigid column

3.2 冲击波阶段荷载特性

起爆后,炸药瞬间变为高温高压的气态物质(爆轰产物),急剧膨胀压缩水体产生初始冲击波向四周传播。冲击波传播过程中受到刚性柱影响会产生反射、透射、绕射现象。图 5 为距刚性柱 $d_e=0.39$ 处水下爆炸冲击波传播过程: $t=1.49$ ms 时,刚性柱附近的冲击波产生反射现象; $t=3.29$ ms 时,反射稀疏波

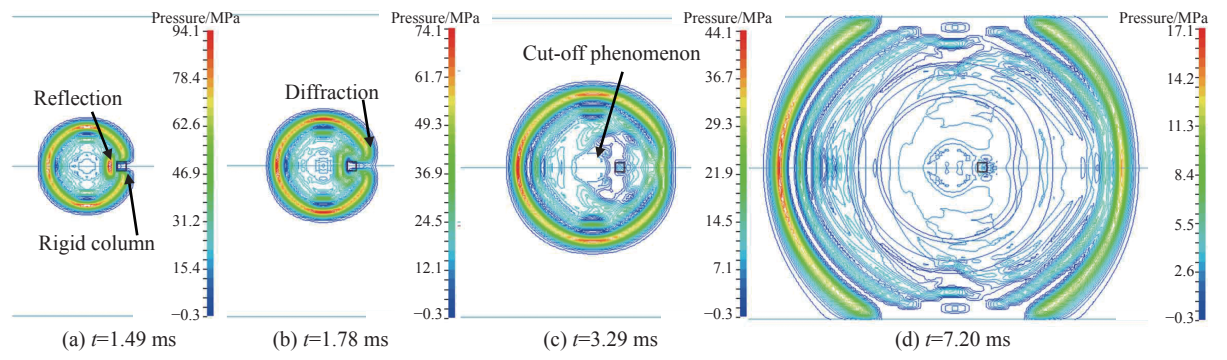


图 5 刚性柱附近冲击波传播过程

Fig. 5 Propagation of shock wave near a rigid column

与入射波在刚性壁迎爆区叠加使峰值压力骤升并产生切断现象,同时冲击波发生绕射在柱后汇聚继续传播; $t=7.20\text{ ms}$ 时,绕射冲击波在传播一定距离后压力云图与左侧冲击波相近。

图6(a)和图6(b)分别为刚性柱的迎爆区($S=2\text{ m}$)和背爆区($S=3\text{ m}$)冲击波压力时程曲线:迎爆区冲击波在达到峰值荷载后下降段出现明显“截断”,即冲击波切断现象,冲击波比冲量衰减;背爆区冲击波下降段变缓,因此冲击波绕射延长了正压作用时间。

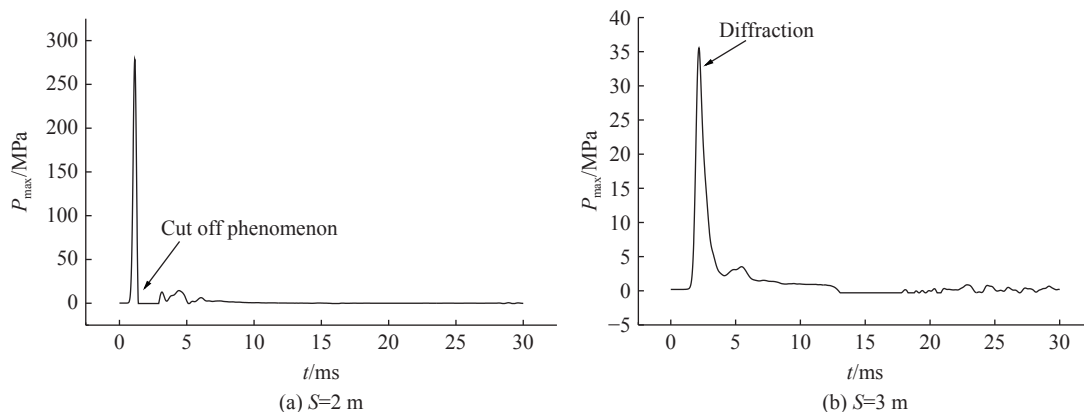


图6 冲击波荷载时程曲线

Fig. 6 Time history curve of shock wave load

在距炸药比例距离 d_e 分别为0.39、0.98和1.95处设置刚性柱,冲击波峰值压力沿测距 S 的变化规律见图7。对比无刚性柱边界条件下冲击波峰值压力变化规律可以发现:刚性柱迎爆区冲击波峰值压力较自由场增加,背爆区较自由场减小。当冲击波传播到刚性柱附近时,刚性柱反射的稀疏波与入射波在迎爆区叠加导致压力上升;冲击波经过反射后绕射能量衰减,因此刚性柱背部压力下降。图8显示了刚性柱附近冲击波比冲量 I_0 的变化规律。刚性柱附近冲击波比冲量的变化规律与冲击波峰值压力基本一致。随着刚性柱与炸药比例距离增加,冲击波传播过程中受水面和水底反射影响,冲击波传播方向复杂,受刚性柱反射、绕射影响减弱,因此,刚性柱附近冲击波峰值荷载以及比冲量变化不大。

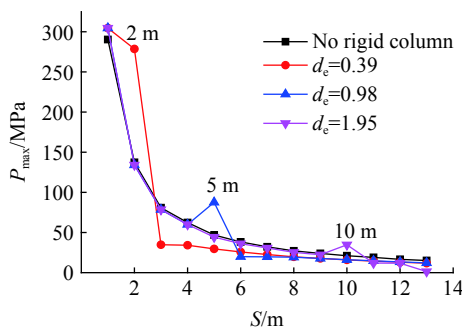


图7 刚性柱附近冲击波峰值压力的变化

Fig. 7 Peak pressure of shock wave near a rigid column

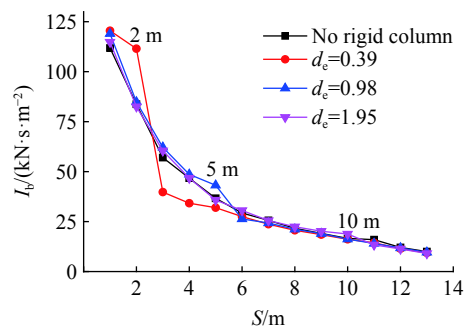


图8 刚性柱附近冲击波比冲量的变化

Fig. 8 Specific impulse of shock wave near a rigid column

表3列出了刚性柱附近冲击波峰值和比冲量较无刚性柱增幅(衰减)。可见:与无刚性柱时相比,刚性柱附近冲击波峰值变化显著;由于迎爆区切断现象“截断”了冲击波荷载,背爆区绕射增加了荷载时长,冲击波比冲量变化幅度较小,并且随着刚性柱比例距离的增加,刚性柱影响减弱。

3.3 气泡脉动阶段荷载特性

水下爆炸产生冲击波时会伴随气泡产生。当气泡在刚性柱附近运动时,膨胀阶段的气泡受刚性柱阻碍,在刚性柱与气泡之间形成低压区;收缩阶段时,气泡由于压力差向刚性柱移动,远离刚性柱的气泡收缩速度较大并向气泡内部凹陷,产生指向刚性柱的射流,在射流方向流场压力骤增,对结构产生脉冲荷载。

表 3 刚性柱附近冲击波荷载比较

Table 3 Comparison of the pressure near a rigid column

d_c	Measuring area	$P_{\max}$			I_b		
		Near rigid column/MPa	No rigid column/MPa	Increase/%	Near rigid column/($\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$)	No rigid column/($\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$)	Increase/%
0.39	In front of column	278.68	137.36	102.88	111.53	83.71	33.23
	Behind the column	34.82	80.88	-56.95	39.77	57.01	-30.24
0.98	In front of column	87.64	46.9	86.87	43.16	36.65	17.76
	Behind the column	19.95	38.78	-48.56	26.30	29.28	-10.18
1.95	In front of column	34.74	21.08	64.80	18.77	16.59	13.14
	Behind the column	11.98	19.02	-37.01	13.36	15.94	-16.19

图 9 为刚性柱附近气泡射流时的流场压力等值线。气泡发生射流时形成指向刚性柱的脉冲荷载,随着刚性柱与炸药比例距离增加,气泡射流现象趋近无刚性柱条件。

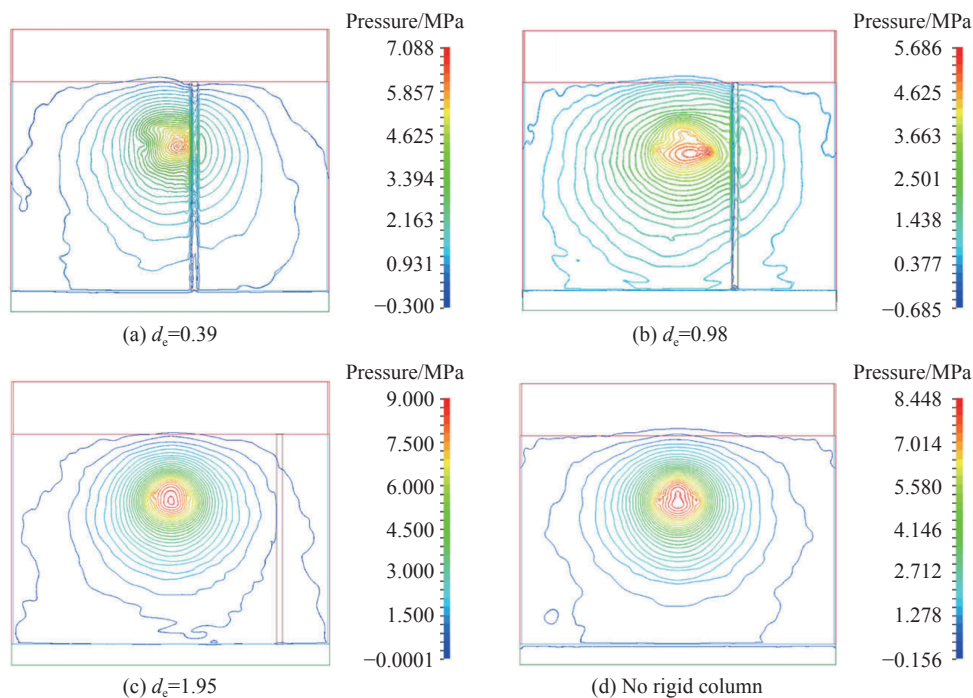


图 9 刚性柱附近气泡射流压力等值线

Fig. 9 Pressure peak contour of bubble impulse near a rigid column

选取 5~10 m 水深的测点,比较刚性柱迎爆区气泡脉冲荷载峰值,如表 4 所示。刚性柱附近水下爆炸气泡受浮力和刚性柱 Bjerknes 力的共同作用,气泡上浮同时发生射流。刚性柱距炸药较近时,刚性柱迎爆区 6~7 m 水深测点处气泡脉冲荷载最大;随着比例距离增加,气泡脉冲荷载最大的测点水深(危险深度)下移;当刚性柱与炸药比例距离大于 1.98 时,不同测

深的气泡脉冲峰值基本一致。当刚性柱与炸药比例距离为 0.98 时,脉冲荷载较自由场增幅最大。这是由于当刚性柱与炸药的距离小于气泡最大半径时,气泡受刚性柱约束无法充分膨胀,气泡射流时刚性

表 4 刚性柱迎爆区气泡脉冲荷载比较

Table 4 Peak pressure of bubble impulse near a rigid column

d_c	$P_{\max}/\text{MPa}$	Depth of the maximum impulse/m	Increase/%
0.39	9.66	6	15.83
0.98	6.33	7	29.45
1.95	1.58		6.04

柱对脉冲荷载的增强效应有限;当刚性柱与炸药距离大于气泡最大半径时,随着比例距离增加,刚性柱对气泡脉动的影响减弱,脉冲荷载增幅减小。

4 结 论

通过数值模拟方法研究刚性柱附近浅水爆炸冲击波和气泡射流的荷载特性,与经验公式对比验证得出下述结论。

(1) 网格尺寸对水下爆炸冲击波荷载的数值模拟精度有显著影响,随着网格尺寸增加,冲击波峰值呈现下降趋势,并且冲击波衰减速度减慢,采用炸药直径 $1/3 \sim 1/2$ 的中心渐变式网格能够得到较为准确的数值模拟结果。

(2) 在水下爆炸冲击波阶段,冲击波在刚性柱附近发生反射、绕射现象。刚性柱迎爆区冲击波峰值压力显著增加,增幅约 $60\% \sim 100\%$;由于冲击波切断现象,比冲量增幅较小,约 $10\% \sim 30\%$ 。刚性柱背爆区压力降低约 50% ,同时由于正压作用时间增加,比冲量衰减约 20% 。

(3) 在水下爆炸气泡脉动阶段,气泡射流形成指向刚性柱的脉冲荷载,刚性柱附近脉冲荷载增加。在刚性柱距炸药一个气泡半径距离时,刚性柱附近的气泡脉冲峰值增幅最大,气泡射流荷载最大的测点深度较爆心上移;随着炸药与刚性柱距离的增加,气泡射流现象减弱,刚性柱与炸药距离大于2倍气泡半径时,刚性柱附近不同测深的脉冲荷载相差不大。

参考文献:

- [1] 高勇军,王伟策,陈小波,等. 浅层水中爆炸冲击波压力的测试与分析[J]. [爆破](#), 1999(1): 9–13.
GAO Y J, WANG W C, CHEN X B, et al. Testing and analysis on shock wave pressure generated by explosion under shallow water [J]. [Blasting](#), 1999(1): 9–13.
- [2] 顾文彬,叶序双,张朋祥,等. 浅层水中爆炸水底影响的试验研究[J]. [解放军理工大学自然科学版](#), 2001, 2(2): 55–58.
GU W B, YE X S, ZHANG P X, et al. Experimental studies of bottom influence in shallow-layer water explosion [J]. [Journal of PLA University of Science and Technology](#), 2001, 2(2): 55–58.
- [3] 顾文彬,孙百连,阳天海,等. 浅层水中沉底爆炸冲击波相互作用数值模拟[J]. [解放军理工大学自然科学版](#), 2003, 4(6): 64–68.
GU W B, SUN B L, YANG T H, et al. Numerical simulation of explosive shockwave interaction in shallow-layer water [J]. [Journal of PLA University of Science and Technology](#), 2003, 4(6): 64–68.
- [4] 韦灼彬,唐廷,王立军. 港口水下爆炸荷载冲击特性研究[J]. [振动与冲击](#), 2014, 33(6): 18–22.
WEI Z B, TANG T, WANG L J. Shock characteristics of underwater explosion in port [J]. [Journal of Vibration and Shock](#), 2014, 33(6): 18–22.
- [5] 方斌,朱锡,张振华. 垂直刚性面边界条件下水下爆炸气泡运动的理论研究[J]. [海军工程大学学报](#), 2007, 19(2): 81–85.
FANG B, ZHU X, ZHANG Z H. Theoretical study of the pulsation of an underwater explosion bubble with a vertical rigid plane [J]. [Journal of Naval University of Engineering](#), 2007, 19(2): 81–85.
- [6] 方斌,朱锡,陈细弟,等. 水平刚性面下方水下爆炸气泡垂向运动的理论研究[J]. [爆炸与冲击](#), 2006, 26(4): 345–350.
FANG B, ZHU X, CHEN X D, et al. Pulsation dynamics of an underwater explosion bubble vertical migrating to a horizontal rigid plane [J]. [Explosion and Shock Waves](#), 2006, 26(4): 345–350.
- [7] 牟金磊,朱石坚,刁爱民,等. 边界条件对水下爆炸气泡运动特性的影响分析[J]. [振动与冲击](#), 2014, 33(13): 92–97.
MU J L, ZHU S J, DIAO A M. Analysis on the characteristics of UNDEX bubbles under different boundary conditions [J]. [Journal of Vibration and Shock](#), 2014, 33(13): 92–97.
- [8] 牟金磊,朱锡,黄晓明. 近壁面水下爆炸冲击波载荷参数研究[J]. [海军工程大学学报](#), 2011, 23(1): 23–27.
MU J L, ZHU X, HUANG X M. Parameters of shock waves from underwater explosion near structures [J]. [Journal of Naval University of Engineering](#), 2011, 23(1): 23–27.
- [9] 朱锡,李海涛,牟金磊,等. 水下近距爆炸作用下船体梁的动态响应特性[J]. [高压物理学报](#), 2010, 24(5): 343–350.

- ZHU X, LI H T, MU J L, et al. Dynamic response of characteristics of ship-like beam subjected underwater explosion in near field [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2010, 24(5): 343–350.
- [10] 张阿漫, 姚熊亮. 复杂边界附近气泡的动态特性研究 [J]. 力学季刊, 2008, 29(1): 24–32.
ZHANG A M, YAO X L. Dynamic of bubble near complex boundary [J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2008, 29(1): 24–32.
- [11] 张阿漫, 姚熊亮. 近自由面水下爆炸气泡的运动规律研究 [J]. *物理学报*, 2008, 57(1): 339–353.
ZHANG A M, YAO X L. The law of the underwater explosion bubble motion near free surface [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(1): 339–353.
- [12] BENJAMIN T B, ELLIS A T. The collapse of cavitation bubbles and the pressures thereby produced against solid boundaries [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1966, 260(1110): 221–240.
- [13] RAJENDRAN R, NARASIMHAN K. Deformation and fracture behaviour of plate specimens subjected to underwater explosion—a review [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 32(12): 1945–1963.
- [14] RAJENDRAN R, LEE J M. Blast loaded plates [J]. *Marine Structures*, 2009, 22(2): 99–127.
- [15] HUNG C F, HWANGFU J J. Experimental study of the behaviour of mini-charge underwater explosion bubbles near different boundaries [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2010, 651: 55.
- [16] WARDLAW A B, LUTON J A. Fluid-structure interaction mechanisms for close-in explosions [J]. *Shock and Vibration*, 2015, 7(5): 265–275.
- [17] 陈永念. 舰船水下爆炸数值仿真及抗爆结构研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
CHEN Y N. Study on damage mechanism in ship underwater explosion and structure anti-shock [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [18] WANG G, WANG Y, LU W, et al. On the determination of the mesh size for numerical simulations of shock wave propagation in near field underwater explosion [J]. *Applied Ocean Research*, 2016, 38(59): 1–9.
- [19] 张社荣, 李宏璧, 王高辉, 等. 水下爆炸冲击波数值模拟的网格尺寸确定方法 [J]. 振动与冲击, 2015, 34(8): 93–100.
ZHANG S R, LI H B, WANG G H, et al. A method to determine mesh size in numerical simulation of shock wave of underwater explosion [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(8): 93–100.

Pressure Characteristics of Shallow Water Explosion near the Rigid Column

LIU Jinghan^{1,2}, TANG Ting², WEI Zhuobin², YU Xiaocun³, LI Lingfeng^{1,2}, ZHANG Yuanhao^{1,2}

(1. *Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;*

2. *Naval Logistics Collage of PLA, Tianjin 300450, China;*

3. *Joint Logistics Support Center Fourth Engineering Agency, Shenyang 110005, China)*

Abstract: Shock wave propagation and bubble jet in the shallow water explosion near a rigid column are affected by many factors. Considering the influence of free water surface, water bottom boundary and rigid column, the coupling numerical model was established based on LS-DYNA, and the feasibility of numerical method is assured by comparison of simulation results and empirical results. The results show that the accuracy of numerical simulation can be better guaranteed if one-third and one-half of the explosive diameter as mesh size is adapted. During the shock wave propagation, the peak pressure in front of the column rises while the cut-off phenomenon causes during the shock wave pressure decreases, and the peak pressure behind the column decreases by approximately 50% while load duration increases. The jet is formed directivity to the column at the complete moment of the first bubble pulsation. The bubble impulse pressure increases most dramatically when the explosive is at a distance of explosive radius from the column, and the depth of the maximum impulse pressure is higher than the depth of explosive.

Keywords: shallow water explosion; rigid column; cut-off phenomenon; jet; numerical simulation