

壳体厚度对战斗部爆炸气泡特性影响的数值模拟研究

程素秋¹, 程鑫²

(1. 中国人民解放军 91439 部队, 辽宁 大连 116041;

2. 上海外高桥造船有限公司, 上海 200137)

摘要 采用 LS-DYNA 软件, 对装药半径为 0.15 m、0.42 m、0.55 m 的战斗部有、无壳体的爆炸特性进行数值模拟研究, 分析了炸药在有壳体的水下爆炸时的冲击波压力、气泡脉动压力等特性参数, 对比总结了不同当量、不同装药半径及有无壳体的数值计算结果。结果表明: 壳体对水下爆炸气泡脉动的影响是较为显著的。壳体厚度对气泡形成时间没有太多影响, 但对气泡压力峰值影响较大。因此, 研究战斗部水下爆炸威力时必须考虑壳体因素, 不能简化。

关键词 爆炸力学; 水下爆炸; 战斗部; 壳体厚度

中图分类号 O382+1 **文献标识码** A

Research on Numerical Simulation for Influence of Shell Thickness on Bubble Characteristics of Warhead Explosion

CHENG Suqiu¹, CHENG Xin²

(1. Unit No. 91439 of PLA, Dalian 116041, China;

2. Shanghai Waigaoqiao Shipbuilding Co., Ltd., Shanghai 200137, China)

Abstract The explosive characteristics of warhead with and without shell under charge radius of 0.15 m, 0.42 m, and 0.55 m are numerically simulated using LS-DYNA software. The characteristic parameters of shock wave pressure and bubble pulsation pressure of the charge with and without shell during underwater explosion are analyzed. Numerical calculation results of different e-
quivalents, different charge radius and with/without shell are compared and concluded. Research results indicate that effect of shell on underwater explosion bubble pulsation is remarkable; while the thickness of shell does not have much influence on formation time of bubble, it is of great influence on pressure peak of bubble. Therefore, the shell of warhead must be considered in underwater explosion research.

Key words explosion dynamics; underwater explosion; warhead; thickness of shell

0 引言

战斗部是兵器实现高效毁伤的重要组成部分。炸药在水下爆炸时, 会产生冲击波和气泡脉动压力波, 二者作用时间和频率不同, 但均会对目标产生毁伤作用。许多学者针对炸药的爆炸特性展开研

究, 近年来这方面的研究成果也较多, 但其中大多数是针对裸药的。事实上, 兵器的炸药都是填装在金属壳体内, 战斗部爆炸时有部分能量用于壳体的燃烧等, 因此研究战斗部壳体对其水下爆炸威力的影响十分必要。

张振华等^[1]利用 DYTRAN 软件对水下爆炸

冲击波进行了数值模拟研究。项大林等^[2]对小当量柱形含铝炸药在厚度为 6 mm 的钢壳或硬铝壳装药下进行了水下爆炸实验与数值模拟研究。盛振新等^[3]运用数值模拟计算了不同壳体厚度的冲击波压力峰值,得到带壳装药水下爆炸峰值压力的拟合公式。张奇等^[4]研究了战斗部壳体壁厚及壁厚半径比对爆炸空气冲击波传播特性的影响。师华强等^[5]研究了水下爆炸冲击波的近场特性。倪宝玉等^[6]探讨了近场爆炸反射冲击波对水下爆炸气泡特性的影响,给出了舰船在近场爆炸反射波作用下气泡的射流特性,程素秋等^[7-8]对舱段模型在水下非接触爆炸下的动态响应进行了数值模拟及试验研究。

1 计算模型

水中兵器战斗部直径多为 0.324~0.533 m,导弹战斗部直径大约为 0.2~0.9 m,因此计算时选取 3 种药包半径 0.15 m、0.42 m 和 0.55 m 作代表。为了避免边界效应对数值模拟产生影响,水域按最小药包所产生气泡的最大半径的 4 倍选取,即水平方向 12 m,水深 12 m,药包距池底距离 12 m。

由于常规武器外壳多为复合金属材料,特选取 4340 钢材料作为包裹高温高压气体的外壳。数值模拟采用并行版 LS-DYNA 软件,数值模拟采用接触算法和 ALE 多材料组的耦合来模拟水下爆炸有壳和无壳两种状态下气泡的溃灭过程。对流体介质,假设为理想流体,用 * Mat_Null 和 Gruneisen 方程联合控制计算;对爆轰产物,假设药包瞬时转

化成高温高压气体,没有能量损失,用炸药的材料和控制方程代替高温高压气体。对 TNT 炸药,用 * Mat_High_Explosive_Burn 和 * EOS_JWL 控制方程联合对高温高压气体进行计算。有限元模型见图 1。

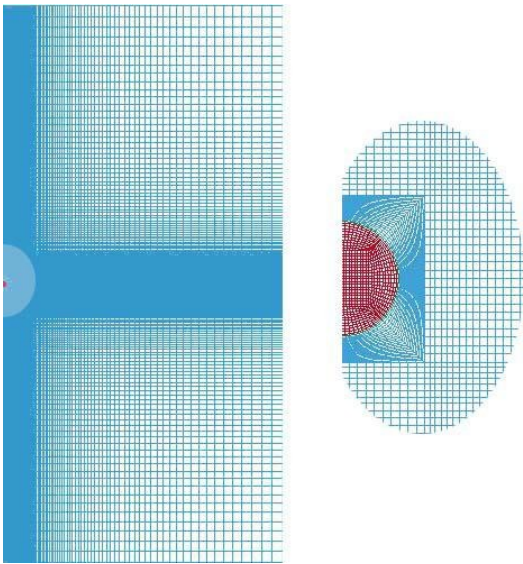


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

2 无限水域中有、无壳体对战斗部爆炸威力的影响

2.1 不同药量无壳药包的爆炸压力对比

本节给出了水域宽×高=12 m×24 m 的气泡模拟结果。药包半径分别为 0.15 m、0.42 m、0.55 m 三种情况。测点选取药包中心点所在水平方向 12 m 处。

表 1 不同药量无壳药包的爆炸特性对比

Table 1 Comparison of explosion characteristics of charge without shell with different weights

工况	药包半径 /m	药量 /kg	气泡最小单元尺寸 /m	气泡单元数 /个	水域单元数 /个	水域线划分比例	冲击波峰值压力/MPa	气泡峰值压力 /MPa	气泡出现时间 /s
1	0.15	20.4	0.005	-	-	0.02×50	23	0.588	0.268
2	0.42	506	0.021	600	24 920	0.1×10	37	1.83	0.544
3	0.42	506	0.020	726	25 456	0.02×50	37	1.78	0.544
4	0.55	1 135	0.033	486	24 284	0.02×50	49	2.02	0.584
5	0.55	1 135	0.022	1 014	26 708	0.02×50	49	1.54	0.58

从表 1 中可以看到,药包半径的增大会导致气泡形成时间的延迟、气泡压力的增大;无壳及气泡最小尺寸相近时,水域划分对数值模拟结果影响不大,气泡和冲击波压力峰值相近。但是气泡最小网

格对计算结果的影响在水域划分相同的情况下也有很大影响。为了进一步揭示两种网格对结果的影响,图 2 给出相同时刻 2 种工况下的气泡压力峰值对应的压力空间分布云图。

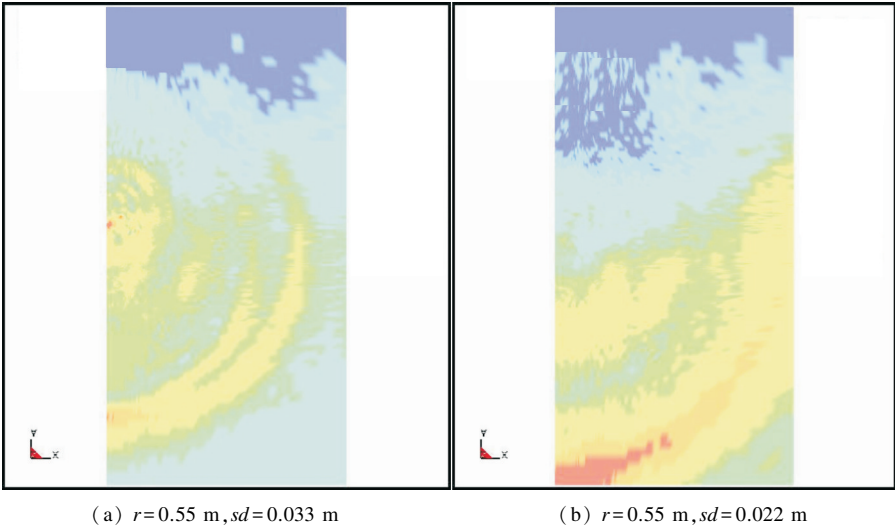


图 2 无壳条件下冲击波压力对比图

Fig. 2 Comparison diagram of pressures of shock wave without shell

从图 2 中可知,图中 sd 是最小网格尺寸,工况(a)的压力传播较工况(b)慢,但压力空间分布的波形较为明显,以气泡为中心呈半圆至 1/4 圆扩散。工况 $sd=0.033\text{ m}$ 的压力先锋已经到达所建模型的边界,并在气泡的正下方形成幅值较强的压力区域,总的看,该工况压力分布近似 1/4 圆,上 1/4 圆缺失。

2.2 不同药量有壳药包的爆炸特性对比

在 2.1 节基础上,考虑了战斗部壳体爆炸后的作用,以寻找有、无壳体对炸药爆炸威力的影响。药包半径 0.15 m 工况下又细分为壳厚 $d=0.006\text{ m}$ 和 $d=0.01\text{ m}$;药包半径 0.42 m 工况下又细分为 $d=0.025\text{ m}$ 和 $d=0.04\text{ m}$;药包半径 0.55 m 工况下又细分为壳厚 $d=0.033\text{ m}$ 和 $d=0.05\text{ m}$ 。

表 2 不同药量有壳药包的爆炸特性对比

Table 2 Comparison of explosion characteristics of charge with shell with different weights

工况	药包半径 /m	药量 /kg	气泡最小单元尺寸 /m	壳厚 /m	气泡单元数 /个	水域单元数 /个	水域线划分比例	冲击波峰值压力/MPa	气泡峰值压力 /MPa	气泡出现时间 /s
1	0.15	23.04	0.005	0.006	600	24 880	0.02×50	26	0.837	0.268
2	0.15	23.04	0.005	0.01	600	24 840	0.02×50	26	0.703	0.276
3	0.42	506	0.1	0.025	54	21 260	0.08×12.5	42	1.732	0.572
4	0.42	506	0.1	0.04	54	21 260	0.02×50	42	2.012	0.588
5	0.55	1 135	0.033	0.033	486	24 284	0.2×50	49	2.220	0.620
6	0.55	1 135	0.022	0.05	1 014	26 708	0.02×50	49	2.472	0.616

从表 2 中可看出,壳体厚度对气泡形成时间影响不太大, $d=0.006\text{ m}$ 的气泡形成时间为 0.268 s , $d=0.01\text{ m}$ 的气泡形成时间为 0.276 s ,延迟只有 2%。气泡压力峰值却由 0.837 MPa 变为 0.703 MPa ,相差 16%;前 2 个模型仅在壳体厚度上从 0.006 m 增加为 0.01 m ,发生 40% 的变化,数值模拟的结果就显示出截然不同的特性,薄壳气泡发

生时间较厚壳早,且得到的气泡压力峰值较高。可见,壳体对水下爆炸气泡脉动的影响是较为显著的。工况 3、4 中壳厚较小($d=0.025\text{ m}$) 的情况气泡发生时间较早,在 0.572 s 产生 1.732 MPa 的气泡压力峰值;壳厚稍大($d=0.04\text{ m}$) 的情况气泡发生时间较晚,在 0.588 s ,且峰值为 2.012 MPa ,稍高于前者,二者相差 14%。

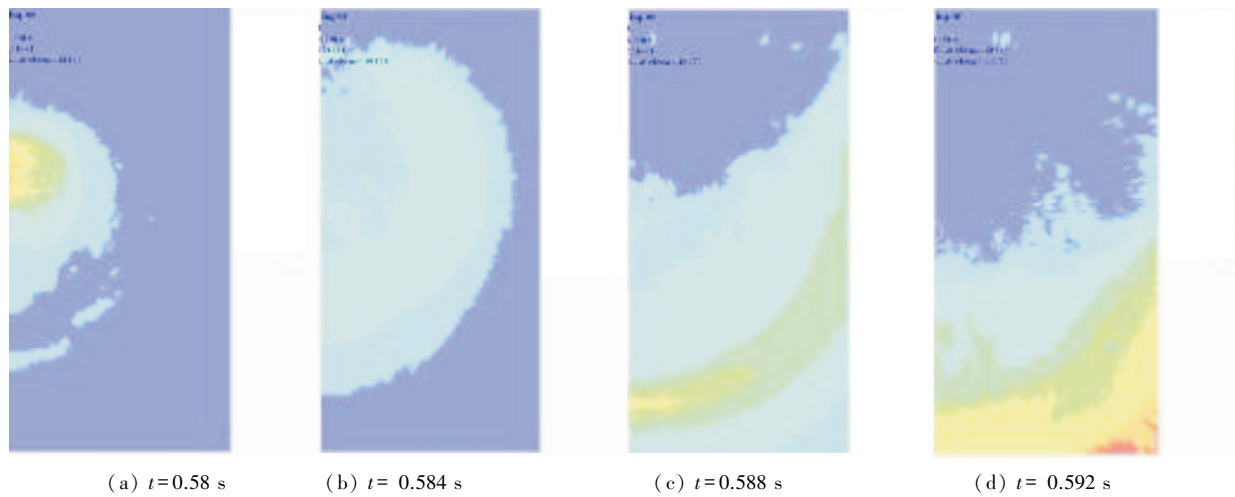


图 3 工况 4 中的时间连续爆炸压力空间分布图

Fig. 3 Pressure spatial distribution diagram of continual explosion under operating condition 4

总之,考虑有壳体情况,半径 $r=0.15\text{ m}$ 、 $r=0.42\text{ m}$ 这 2 种工况下,气泡压力峰值形成时间为薄壳时间早;半径 $r=0.55\text{ m}$ 气泡峰值出现时间为厚壳较早。对于气泡压力峰值情况,半径 $r=0.55\text{ m}$ 、 $r=0.42\text{ m}$ 峰值为厚壳较大。可以发现,水下爆炸气泡的出现时间、峰值大小并不随壳体厚度的增加而线性增长,而是与药包初始半径有关系,有壳气泡的动力学过程规律还有待进一步研究。但可以肯定的是随着药包质量的增加,有壳药包产生的气泡峰值发生时间是延迟的,而且幅值增加。

2.3 相同药量情况下有、无壳体对气泡的影响

前面分别比较了无壳、有壳情况下数值计算中气泡脉动的特点,为进一步揭示气泡运动规律,按初始药包半径大小,分别就有、无壳体作对比分析,所有工况设置及计算结果详见表 3。

在 $r=0.15\text{ m}$ 情况下,由于药包半径较小,质量不到 10 kg ,壳比较薄,能量转换过程不是很剧烈,

能够做到在同一网格模型下展开 4 种工况的数值计算。

在 $r=0.42\text{ m}$ 情况下,对工况 5 和工况 6($d=0.025\text{ m}$),气泡单元网格划分一致,水域划分有区别;对工况 7 和工况 8($d=0.04\text{ m}$) 没有采用相同密度的网格。但从得到的气泡计算对比结果来看,在药包网格划分比例相近的前提下,无论水域采用哪种网格,无壳情况气泡峰值精度无太大变化,只有 2.75% 的差异。

与前面 2 个半径相比, $r=0.55\text{ m}$ 的 4 种工况保持了较高的网格一致性;但在水域网格相同情况下,气泡单元的差异会对结果造成明显影响。工况 9 与工况 11 相比,虽然气泡压力幅值同为一个量级,但前者比后者气泡峰值高近 24%,峰值所在时间晚了一个时间步。总之,有壳相对于无壳药包爆炸时加强了气泡的峰值,并产生一定的时间延迟。

表 3 有、无壳体药包的爆炸特性对比

Table 3 Comparison of explosion characteristics of charge with and without shell

工 况	有无 壳体	药包半径 /m	壳厚 /m	气泡最小单元 尺寸/m	水域线 划分比例	气泡峰值压力 /MPa	气泡出现 时间/s
1	无	$r=0.15$	$d=0$	0.005	0.02×50	0.588	0.268
2	有	$r=0.15$	$d=0.006$	0.005	0.02×50	0.837	0.268
3	无	$r=0.15$	$d=0$	0.005	0.02×50	0.588	0.268
4	有	$r=0.15$	$d=0.01$	0.005	0.02×50	0.703	0.276
5	无	$r=0.42$	$d=0$	0.021	0.1×10	1.827	0.544
6	有	$r=0.42$	$d=0.025$	0.021	0.5×20	2.362	0.56
7	无	$r=0.42$	$d=0$	0.021	0.02×50	1.778	0.544
8	有	$r=0.42$	$d=0.04$	0.1	0.08×12.5	2.012	0.588
9	无	$r=0.55$	$d=0$	0.033	0.02×50	2.020	0.584
10	有	$r=0.55$	$d=0.033$	0.033	0.2×50	2.220	0.62
11	无	$r=0.55$	$d=0$	0.022	0.02×50	1.539	0.58
12	有	$r=0.55$	$d=0.05$	0.022	0.02×50	2.472	0.616

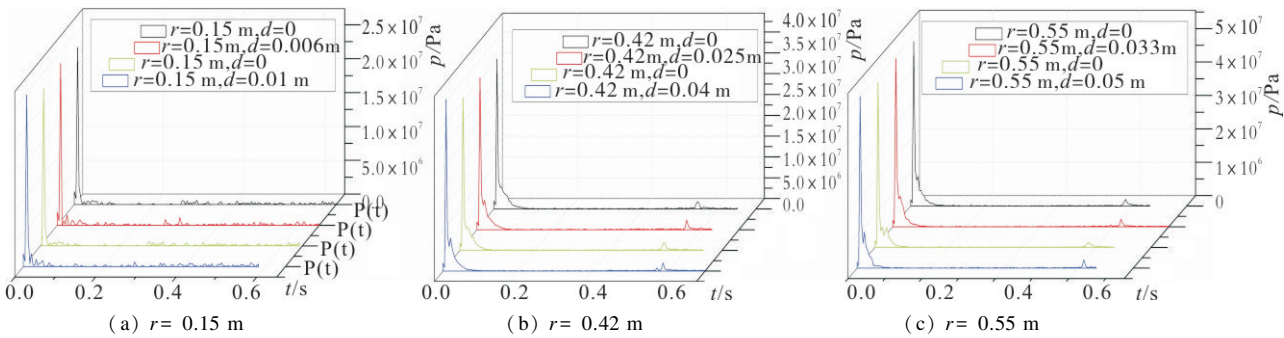


图 4 不同药量下多种工况冲击波曲线对比

Fig. 4 Comparison of shock wave curves of different charge weights under various operating conditions

从图 4(a) 可知,在倒数衰减、倒数衰减后端、气泡膨胀以及脉动等各阶段有不同程度的震荡现象。工况 1 气泡脉动出现多个波峰,在 $t=0.268 \sim 0.304$ s 之间出现了 5 个波峰;工况 4 也有着类似的特性,表现在 $t=0.34$ s 后的数值震荡上。这种震荡是由于气泡的脉动收缩膨胀引起的。有壳比无壳的气泡压力峰值明显,幅值较高,时间上除工况 4 的气泡峰值形成时间较晚外其他没有差异。

对于图 4(b),气泡的压力时程曲线较为光顺,除工况 8 外,均只有一个独立的波峰;有壳比无壳产生的气泡压力峰值高,且形成时间晚。这是由于无壳药包爆炸后能量迅速向水介质扩散、传热,伴随着强烈的化学能、热能、内能、动能等能量和冲量的转换,系统内能消耗较快;而有壳药包爆炸时,因壳体保存了相当多的能量,虽然会有一部分能量被用于提供给壳的破碎,但壳体对能量保护的优越性还是占主要地位的。可见对于战斗部装药水下爆炸的数值模拟,壳体因素还是需要考虑,不能简化。

对于图 4(c), 气泡的数值模拟结果较为光顺, 没有出现多个峰值的波峰群, 压力时程曲线走势一致, 冲击波峰值量级相同。有壳较无壳工况气泡峰值高, 但形成时间稍晚。

3 结束语

通过对战斗部装药外有、无壳体的水下爆炸气泡特性的数值模拟研究, 可得到以下结论:

1) 战斗部壳体对其水下爆炸气泡脉动的影响是较为显著的。壳体厚度对气泡二次脉动的形成时间没有太多影响, 薄壳所形成的气泡发生时间较厚壳早, 且得到的气泡压力峰值较高; 但峰值大小不是随壳体厚度的增加而线性增长的, 而是与药包初始半径有关系。2) 对于战斗部水下爆炸威力的数值模拟, 战斗部壳体因素必须考虑, 不能简化。

参考文献

[1] 张振华, 朱锡, 白雪飞. 水下爆炸冲击波的数值模拟研

究[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(2): 182-188.

[2] 项大林, 荣吉利, 李健, 等. 金属壳体装药水下爆炸的冲击波特性[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(1): 67-72.

[3] 盛振新, 刘荣忠, 郭锐. 壳体厚度和爆炸深度对水下爆炸冲击波的影响[J]. 火炸药学报, 2011, 34(3): 45-47.

[4] 李健, 荣吉利, 杨荣杰, 等. 水中爆炸冲击波传播与气泡脉动的实验及数值模拟[J]. 兵工学报, 2008, 29(12): 1437-1443.

[5] 师华强, 宗智, 贾敬蓓. 水下爆炸冲击波的近场特性[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(2): 125-130.

[6] 倪宝玉, 张阿漫, 朱枫, 等. 舰船近场爆炸反射波对气泡射流特性影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(8): 976-983.

[7] 程素秋, 樊宝顺, 薛飞, 等. 水下非接触爆炸作用下舱段模型的动态响应[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(4): 360-366.

[8] 程素秋, 王永亮, 谭婕, 等. 远场非接触爆炸作用下舱段模型动响应的数值模拟[J]. 船舶工程, 2009, 31(1): 60-63.