

水下爆炸数值仿真研究*

徐豫新¹, 王树山¹, 李 园²

(1 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;

2 五洲工程设计研究院, 北京 100053)

摘要:研究水下爆炸数值仿真相关影响因素。针对有限差分程序 AUTODYN 在水下爆炸仿真研究中的应用, 采用不同计算模型, 对无限水域中半径为 10mm 的 TNT 球状药爆炸产生的冲击波传播及气泡脉动现象进行数值仿真, 对计算结果进行对比分析。据此, 对影响计算结果的相关因素进行了探讨, 得出具有重要参考价值的研究结论。对水下爆炸数值仿真具有一定借鉴意义。

关键词:水下爆炸; 数值仿真; AUTODYN 软件

中图分类号: O383.1 **文献标志码:** A

Study on Numerical Simulation of The Underwater explosive

XU Yuxin¹, WANG Shushan¹, LI Yuan²

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

2 Wuzhou Engineering Design and Research Institute, Beijing 100053, China)

Abstract: The correlation affection factor of numerical simulation on underwater explosive is studied. In allusion to the application of AUTODYN program during underwater explosive, The numerical simulation of 10mm TNT spherical charge explosive give birth to shock wave transmission and bubble pulse is done on different compute models. Hereby, the simulation outcome and correlation factor about affecting calculation result is analyzed and discussed, moreover, the importance value study conclusion is obtained. It is some reference significance for numerical simulation of underwater explosive.

Keywords: underwater explosive; numerical simulation; AUTODYN program

0 引言

水下爆炸是水中兵器终端能量输出、转换的重要途径之一, 是水中兵器设计、破坏效应研究的基础问题。水下爆炸倾向于研究装药爆轰、冲击波传播及气泡脉动现象三个方面问题。数值仿真作为一有效手段, 可较好的辅助于水下爆炸的研究工作, 但从近五届国际弹道会议可以看出, 该方面的研究尚处于初步阶段^[1]。文中针对无限水域中水下爆炸问题, 采用 AUTODYN 有限元软件, 建立有限元计算模型, 进行水下爆炸现象的数值仿真。同时, 对影响计算结果的相关因素进行了探讨。

1 水下爆炸相关仿真软件

水下爆炸数值仿真具有载荷作用时间长、计

算规模大、结构大变形等特点, 给数值计算软件提出了更高的要求。目前, 国内外对于水下爆炸问题一般使用 LS-DYNA、DYTRAN、ABAQUS、AUTODYN 四种软件进行分析。辛春亮^[2]对四种数值计算软件在水下爆炸仿真中的应用进行了比较认为: AUTODYN 在水下爆炸仿真方面功能最为全面, 计算稳定性较好, 优势明显, 且提供了结果映射 Remap、网格重分、网格细化和粗化技术, 非常适合水下爆炸数值仿真。

2 水下爆炸数值仿真

2.1 状态方程及初始条件

AUTODYN 中提供了 POLYNOMIAL 和 SHOCK 两类状态方程来描述水中压力变化, 其中水中单位质量内能可由式(1)^[3]计算给出。

$$E = (\rho gh + P_0) / \rho / B_0 \quad (1)$$

式中: ρ 为水的密度 (kg/m^3); h 为水深 (m); P_0 为

* 收稿日期: 2008-12-09

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划资助

作者简介: 徐豫新(1982-), 男, 河北唐山人, 博士生研究生, 研究方向: 水下终点效应。

大气压强(Pa)。如果忽略水深的影响,水的比内能为 361.875J/kg。

对于 TNT 一般采用 JWL 方程描述爆轰产物中的压力,AUTODYN 中提供了两套 JWL 状态方程参数,分别来自于 Lee Finger&Collins (1973) 和 B. M. Dobratz&P. C. Crawford (1981)^[4]。

对于数值仿真,研究计算模型、网格密度及参数对结果的影响因素,并对不同水深情况、爆炸场威力进行分析,仿真计算条件如下:

TNT 为半径 10mm 球形药包,密度取 1.6g/cm³,质量为 6.702g。

2.2 冲击波传播过程仿真

2.2.1 一维轴对称 WEDGE 计算模型



图 1 一维轴对称 WEDGE 计算模型

建立一维轴对称 WEDGE 计算模型,计算水域取 15m,计算网格 X 方向尺寸为 1mm,见图 1。水采用 POLYNOMIAL 状态方程及相应参数,比内能取 361.875J/kg;炸药采用 JWL 状态方程及软件提供的 Lee Finger&Collins(1973) 参数;设置 flow-out 边界条件;一阶、二阶粘性系数分别取软件默认的参数,建立有限元模型。采用 Euler, 2D 求解器,通过计算得出冲击波传播过程和式(2)^[5] 计算结果对比见图 2。

$$P_m = 52.2 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{r} \right)^{1.13}, \left(0.078 < \frac{\sqrt[3]{\omega}}{r} < 1.57 \right) \quad (2)$$

式中: P_m 为水中爆炸峰值压力(MPa), ω 为药包质量(kg); r 为距爆心的距离(m)。

2.2.2 二维轴对称 CIRCLE 计算模型

建立二维轴对称 CIRCLE 计算模型,因网格限制,计算水域取 1.02m,计算网格 X、Y 两个方向尺寸均为 1mm,见图 3。计算初始条件与上述相同,通过计算得出冲击波传播过

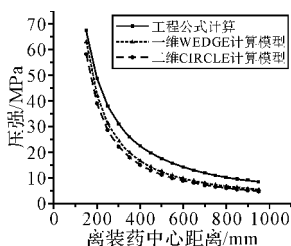


图 2 不同计算模型冲击波波峰衰减对比图

程和式(2)^[5] 计算结果对比见图 2。通过对比可以看出同样计算网格密度前提下,一维计算模型和二维计算模型计算得出冲击波衰减规律与工程计

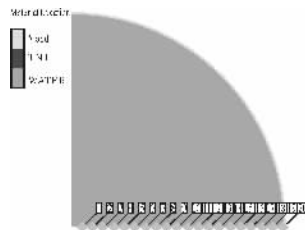


图 3 二维轴对称 CIRCLE 计算模型

算所得规律基本一致,二维计算模型计算结果初值略高于一维计算结果。

2.3 气泡脉动现象仿真

建立一维计算模型计算气泡脉动现象,计算水域取 15m,计算初始条件与上述相同,计算网格 X 方向尺寸为 1mm,数值计算得出气泡首次最大半径为 271mm,比式(3)^[6] 计算得出的 300.7mm 小 9.88%,数值计算得出气泡首次脉动周期为 47.1ms,比式(4)^[6] 计算得出 54.3ms 小 13.3%。

$$R_m = 1.60 \left(\frac{\omega}{P_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

$$T_1 = 1.49 \left(\frac{3\rho}{2P_{w0}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{P_{g0}}{(K-1)P_{w0}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot r_0 \quad (4)$$

式中: R_m 为气泡首次最大半径(m); ω 为药包质量(kg); P_0 为周围水的静水压(10^5 Pa); T_1 为气泡第一次脉动的周期; ρ 为水的密度(kg/m^3); P_{w0} 为药包初始位置的静水压强(Pa); K 为爆炸气体比热比,一般取 4/3; P_{g0} 为气泡中气体的初始压强(Pa); r_0 为药包半径(m)。

3 数值仿真影响因素分析

3.1 计算网格对数值仿真影响

对于一维计算模型,在同样计算初始条件下,计算网格 X 方向尺寸分别取 0.5mm, 1.0mm, 1.5mm 进行计算,得出各自冲击波衰减规律,见图 4。三种情况下气泡首次最大半径和气泡首次脉动周期如表 1 所列。通过对比可以看出对于一维计算模型,计算网格尺寸取 0.5 ~ 1.5mm 之间计算结果变化不大。但爆炸的初始压强都低于经验公式计算结果,可能由于状态方程标定中忽略了圆筒破裂时爆轰产物压力所造成。

表 1 不同计算网格尺寸气泡脉动特性对比

计算结果	网络尺寸 /mm			经验公式
	0.5	1.0	1.5	
首次最大半径 /mm	268.1	271.0	273.1	300.7
首次脉动周期 /ms	46.5	47.1	49.3	54.3

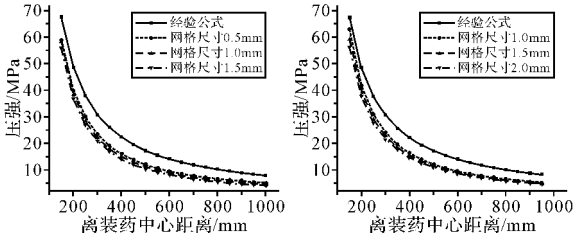


图 4 一维计算模型不同网格尺寸计算对比
 图 5 二维计算模型不同网格尺寸计算对比

对于二维计算模型,在同样计算条件下,计算网格 X、Y 两个方向尺寸取 1.0mm,1.5mm,2.0mm 进行计算,得出各自冲击波传播过程见图 5。通过对比可以看出,计算网格尺寸越大,计算所得出的冲击波近场压强越低,但各自冲击波传播衰减规律几乎一致,且冲击波压强在远场趋于一致。

3.2 状态方程及参数对数值计算影响

采用一维计算模型,水状态方程为 SHOCK,计算网格 X 方向尺寸取 0.5mm,其余计算条件不变,计算得出结果见图 6。通过对比发现采用 SHOCK 状态方程计算,冲击波压力近场要高于 POLYNOMIAL 状态方程计算结果,远场两者几乎一致,且两者冲击波传播衰减规律一致。但采用 SHOCK 状态方程计算,水中初始压强为 0MPa,无法通过设置比内能改变环境压力,且采用 SHOCK 状态方程计算时气泡无节制扩大,无法描述水中爆炸所产生的气泡脉动现象。

采用一维计算模型,TNT 状态方程参数取 B. M. Dobratz & P. C. Crawford(1981)值,计算网格 X 方向尺寸取 0.5mm,其余计算条件不变,计算结果见图 7。通过对比可以看出两种 TNT 状态方程计算得出结果差别不大,采用 B. M. Dobratz & P. C. Crawford (1981) 参数计算得出

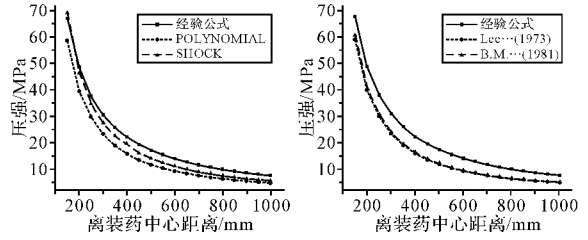


图 6 一维计算模型不同水状态方程对比
 图 7 一维计算模型不同 TNT 状态方程对比

3.3 计算区域对计算结果影响

对于一维轴对称 WEDGE 计算模型,在计算初始条件相同前提下,计算水域分别取 5.0m、10.0m、20.0m 计算得出气泡首次最大半径和气泡首次脉动周期列于表 2。通过对比可以看出计算水域越小,气泡首次最大半径计算值越小,说明计算模型建立过程中虽有边界条件,但仍存在边界反射现象,较小计算水域并不能很好描述气泡脉动现象。

表 2 不同计算水域气泡脉动特性对比

计算结果	计算水域 /m				经验公式
	5.0	10.0	15.0	20.0	
首次最大半径 /mm	220.1	259.1	271.0	272.1	301.6
首次脉动周期 /ms	25.0	40.96	47.1	48.4	54.3

3.4 粘性系数对计算结果影响

引入粘性系数是为了光滑冲击波阵面,对于一维计算模型,在计算条件相同的前提下,修改一次项粘性系数 0.2 为 0.16、0.14,修改二次项粘性系数 1.0 为 0.8、0.6 进行计算得出冲击波波峰压力衰减规律,见图 8。通过对比可以看出粘性系数的减少,可以提高冲击波近场压强,对于远场来讲,粘性系数的影响较小。

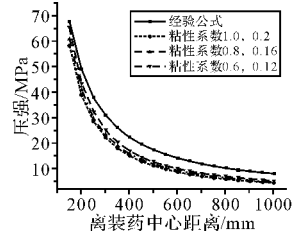


图 8 一维计算模型不同粘度系数对比

3.5 水深对计算结果影响

对于一维轴对称 WEDGE 计算模型,计算水域为 15m,网格密度为 1.0mm,水的比内能分

phenomenology of confined ceramic targets and impact rods[J]. International Journal Impact Engineering, 1990, 19(3): 263-275.

[4] Shim VP W, Lime T, Fook J. Dynamic mechanical properties of fabric armour[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 25(1): 1-15.

[5] 梅志远,朱锡,任春雨,等. 弹道冲击下层合板破坏模式及抗弹性能实验研究[J]. 海军工程大学学报, 2005, 17(1): 11-15.

[6] 魏伯荣,蒋海滨,金冰,等. 芳纶复合材料抗锥体冲击特性研究[J]. 航空材料学报, 2001, 21(4): 42-45.

[7] 韩辉,李楠. 防弹纤维复合材料及其在武器装备中的应用[J]. 高科技纤维与应用, 2005, 30(1): 40-43.

[8] Naik N K, Shrirao P. Composite structures under ballistic impact[J]. Composite Structures, 2004, 66(1/4): 579-590.

[9] Yadav S, Ravichandran G. Penetration resistance

of laminated ceramic/polymer structures[J]. International Journal Impact Engineering, 2003, 28(5): 557-574.

[10] 魏伯荣,蒋海滨,李名琦. 锥体冲击芳纶复合材料的损伤及其机理研究[J]. 航空材料学报, 2001, 21(1): 47-50.

[11] 彭刚,冯家臣,曲英章,等. 组合间隙对纤维/陶瓷复合板抗弹性能的影响[J]. 弹道学报, 2004, 16(1): 60-64.

[12] 李永池,王道荣,姚磊,等. 陶瓷材料的抗侵彻机理和陶瓷锥演化的数值模拟[J]. 弹道学报, 2004, 16(4): 12-17.

[13] 韩永要,赵国志,方清,等. 动能弹侵彻多层陶瓷装甲数值模拟研究[J]. 工程力学, 2006, 23(8): 182-186.

[14] 张晓晴,杨桂通,黄小清. 弹体侵彻陶瓷/金属复合装甲问题的研究[J]. 工程力学, 2006, 23(4): 155-159.

(上接第 97 页)

别取 361.875、542.81、723.75、904.69、1085.63 及 1266.56J/kg 计算得出不同水深情况下的冲击波波峰压力衰减规律,见图 9,并得出气泡首次最大半径和气泡首次脉动周期列于表 3。通过对比说明水深所产生的压力对冲击波的影响不大,曲线几乎重合,但对气泡脉动的影响较大。

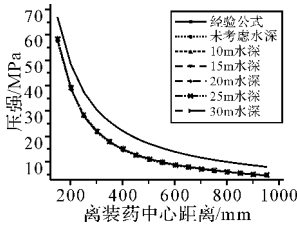


图 9 不同水深计算结果对比

表 3 不同计算水域气泡脉动特性对比

计算结果	计算水深/m				
	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0
首次最大半径/mm	242	220	204	192	182
首次脉动周期/ms	35.1	28.1	23.5	20.4	18.1

4 结论

通过以上仿真计算可以得出以下结论:

- 1) 在状态方程、计算网格尺寸、人工粘性系数及计算边界条件设置适当情况下,一维和二维计算都可精确描述水下爆炸威力场;
- 2) 水采用 SHOCK 状态方程可较好描述水中冲击波压力衰减,但无法描述气泡脉动现象,对于 JWL 状态方程来讲,采用 B. M. Dobratz&P. C.

Crawford (1981)参数计算所得值更加接近工程计算值;

3) flow-out 边界条件对于较大计算区域仍存在边界反射现象,其的使用仍需进一步的探讨;

4) 粘性系数的设置对近场冲击波压力波峰值的计算影响较大,应在试验基础上根据不同水质和计算网格密度进行标定;

5) 爆炸所产生的冲击波受水深影响不大,但气泡脉动受水域深度影响较大。

参考文献:

[1] J P Lu, T Clarke. Studies of underwater explosion [C]// 21st International Symposium on Ballistics, Adelaide, Australia, 2007; 955-962.

[2] 辛春亮,秦健,徐更光,等. 数值模拟软件在水下爆炸模拟中的应用研究[C]// 第四届全国爆炸力学实验技术学术会议, 2006: 232-236

[3] 辛春亮. 高能炸药爆炸能量输出结构的数值分析[D]. 北京:北京理工大学, 2008

[4] AUTODYN explicit software for nonlinear dynamics user manual[M]. ANSYS, Inc., 2005.

[5] 随树元,王树山. 终点效应学[M]. 北京:国防工业出版社, 2000.

[6] 梁龙河. 水下爆炸特性的数值研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院.

[7] 安世亚太. ANSYS AUTODYN 在水下爆炸模拟中的应用[J]. CAD/CAM 与制造业信息化, 2005, 12(7): 45-47.