

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.06.027

聚能战斗部侵彻水介质装甲仿真试验

陈高杰, 程素秋

(中国人民解放军 91439 部队, 辽宁 大连 116041)

摘要: 为了提高现代潜艇的抗毁伤能力, 使用 LS-DYNA 软件的多物质 ALE 算法对鱼雷聚能战斗部侵彻水介质装甲进行了仿真试验分析。从鱼雷的毁伤机理出发, 定义了材料模型和状态方程, 给出了侵彻体头部传播路径上节点的最大速度拟合曲线, 并解决了仿真试验中经常出现的计算不稳定问题。仿真结果表明, 所设计的战斗部满足考核要求, 可为聚能战斗部毁伤威力评估和潜艇模拟靶设计提供参考。

关键词: 聚能战斗部; 侵彻; 数值仿真; 水介质装甲

中图分类号: TJ630.2 **文献标志码:** A

Simulation Test of Shaped Charge Warhead on Penetration Water Medium Armor

Chen Gaojie, Cheng Suqiu

(No. 91439 Unit of PLA, Dalian 116041, China)

Abstract: In order to improve the anti-damage capability of the modern submarines, this paper used multi-material ALE algorithm of LS-DYNA software to conduct the simulation test analysis of shaped charge warhead penetrating water medium armor. Based on damage mechanism of the torpedo, material models and equations of state (EOS) were defined. And then the fitting curve of the maximum node velocity on the propagation path of the penetration head was given. The problem of computing instability often appearing in simulation test also was solved. The simulation results showed that the designed warhead can meet check request, and can afford reference for the evaluation of shaped charge warhead damage power and simulate targets design of submarine.

Key words: shaped charge warhead; penetration; numerical simulation; water medium armor

0 引言

由于现代潜艇结构上采用双层壳体加水舱, 常规爆破式战斗部已很难对潜艇致以重创。而采用聚能战斗部爆炸后形成射流具有很强的侵彻能力, 可破坏潜艇装甲和内部纵深方向的设备和结构, 因而采用聚能战斗部是提高鱼雷毁伤威力的有效手段^[1-3], 也是鱼雷的重要发展方向之一。随着数值仿真技术的不断发展, 对鱼雷聚能战斗部进行仿真试验成为了重要的水中兵器毁伤威力考核评估手段; 因此, 笔者对聚能战斗部侵彻水介质装甲进行仿真研究。

1 鱼雷聚能战斗部

1.1 作用机理

鱼雷聚能战斗部是将爆炸所产生的能量定向攻击目标, 在该方向上形成介于自锻弹丸与短粗射流之间的一种高速度、小梯度的弹丸, 侵彻水介质时, 能利用空化效应保持低阻运动, 出水后又能突破靶的熔化与强度封锁, 产生既穿孔又剪孔的理想破坏效果, 从而击穿潜艇的外壳, 穿过水舱, 在耐压壳上开相当孔径的孔洞, 使潜艇进水沉没^[3]。

鱼雷聚能战斗部爆炸后会形成爆炸成型杆式侵彻体 (jetting projectile charge, JPC)^[4], JPC 没有明显的杆体和射流之分, 对炸高不敏感, 径向尺寸适中, 受拉伸会断裂形成多段侵彻体, 前驱侵彻体可在水中形成较理想的空腔, 以供后续侵彻体在空腔中低阻随进, 水中侵彻过程速度衰减慢, 有利于提高侵彻深度^[5]。

1.2 组成

鱼雷聚能战斗部的典型结构由雷管、传爆药柱、主药柱、药型罩等部分组成。图 1 为聚能战斗部典型结构的示意图^[6]。

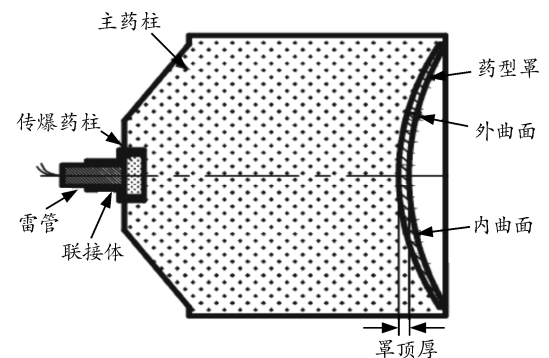


图 1 聚能战斗部典型结构示意图

收稿日期: 2012-02-15; 修回日期: 2012-03-19

作者简介: 陈高杰(1981—), 男, 湖北人, 硕士, 助理工程师, 从事水下爆炸仿真与评估研究。

2 仿真试验模型

2.1 计算模型

仿真试验计算模型采用 LS-DYNA 软件的多物质 ALE 算法来模拟鱼雷聚能战斗部侵彻水介质装甲试验, 鱼雷作用方式为垂直命中接触爆炸。如图 2 所示, 模型从前至后依次为聚能战斗部、鱼雷自导头段及潜艇非耐压壳模拟靶、水介质装甲、潜艇耐压壳模拟靶等。由于结构和爆炸作用载荷的对称性, 取 1/4 结构建立三维计算模型。药型罩选用爆炸成形侵彻体速度衰减较慢的半球形罩^[3], 炸药起爆方式为单点中心起爆。

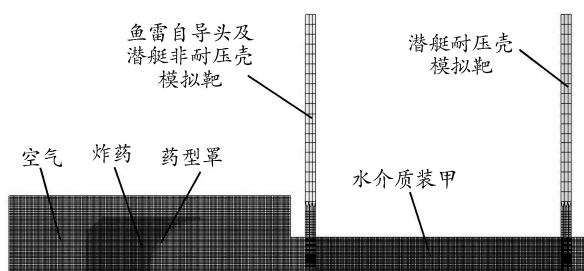


图 2 仿真计算有限元模型图

通过关键字 *ALE_MULTI-MATERIAL_GROUP 定义 ALE 多物质间的相互作用。结构模拟靶采用 Lagrange 单元和单点积分算法。Euler 单元和 Lagrange 单元之间应用关键字 *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 定义流固耦合。Lagrange 单元采用 von Mises 屈服准则, 以等效失效应变为判据删除失效单元和节点, 空气和水介质设定为无反射边界, 防止边界应力波反射。

2.2 材料模型和状态方程

炸药采用高能炸药燃烧与增长材料模型和 (jones-wilkins-lee, JWL) 状态方程; 药型罩采用 Steinberg 材料模型和 Gruneisen 状态方程; 空气采用空白材料模型和线性多项式状态方程; 水选用空白材料模型和 Gruneisen 状态方程; 鱼雷自导头段及潜艇非耐压壳、耐压壳模拟靶采用塑性随动强化材料模型。

JWL 状态方程定义为

$$p_{JWL} = A \left[1 - \frac{\omega}{VR_1} \right] \exp(-R_1 V) + B \left[1 - \frac{\omega}{VR_2} \right] \exp(-R_2 V) + \frac{\omega e}{V} \quad (1)$$

其中: $V = \rho_0 / \rho$; ρ_0 为炸药初始密度; ρ 为爆炸产物密度; p_{JWL} 为压力; e 为比内能; A, B, R_1, R_2, ω 为 JWL 常数。

Gruneisen 状态方程定义为

$$p = \frac{\rho_0 c_0^2 \mu \left[1 + (1 - \frac{\gamma_0}{2}) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (s_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]} + (\gamma_0 + a \mu) e \quad (2)$$

变化后可得到 Mie-Gruneisen 方程:

$$p = \frac{\rho_0 C_0^2 \eta}{(1 - s \eta)^2} \left[1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2} \right] + \Gamma_0 \rho_0 e \quad (3)$$

其中: $\eta = (1 - \rho_0) / \rho$, ρ_0 为初始密度, ρ 为状态变化后密度; p 为压力; e 为比内能; C_0, s 为材料参数; Γ_0 为 Gruneisen 参数。

线性多项式状态方程定义为

$$p = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E \quad (4)$$

假定满足 gamma 状态方程, 则

$$C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0, \quad C_4 = C_5 = \gamma - 1 \quad (5)$$

其中, γ 为比热比 (绝热指数)。

2.3 结果分析

装药从药顶中心起爆, 球形爆轰波向药型罩运动, 药型罩顶部首先受到爆轰波的冲击作用, 并开始向外翻转, 形成侵彻体头部。由于侵彻体头部首先受到爆轰波作用, 其速度比其它部分要大, 随着爆炸冲击波的连续作用, 药型罩通过轴向压垮和变形, 最后形成稳定飞行的爆炸成型杆式侵彻体。

图 3 给出了侵彻体头部传播路径上节点的最大速度拟合曲线。炸药爆轰后推动药型罩形成侵彻体, 在 150 μs 时侵彻体头部达到最大速度 2 236.3 m/s (如图 4(a)), 470 μs 侵彻鱼雷自导头及非耐压壳模拟靶, 随后进入水介质装甲, 侵彻体头部出现削平的现象 (如图 4(b)), 速度不断减小, 在 850 μs 时又开始增大, 这是由于侵彻体头部速度减小的同时为后面的侵彻体开辟通道, 使后面的侵彻体赶上头部, 速度产生再次增大的现象, 紧接着在 900 μs 时侵彻体再次到达 1 900 m/s 的最大速度, 进入第 2 次衰减期, 960 μs 时侵彻体出现拉断现象 (如图 4(c)), 1 100 μs 时速度再次衰减到最小, 后部侵彻体再次追赶上头部使速度再次增大, 1 300 μs 时速度第 3 次达到 1 900 m/s 的最大速度, 1 360 μs 时开始侵彻潜艇耐压壳模拟靶, 1 480 μs 完成侵彻 (如图 4(d))。

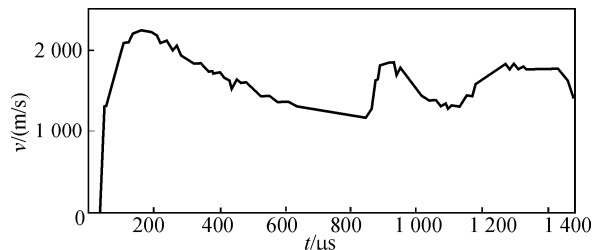


图 3 侵彻体头部传播路径上峰值速度

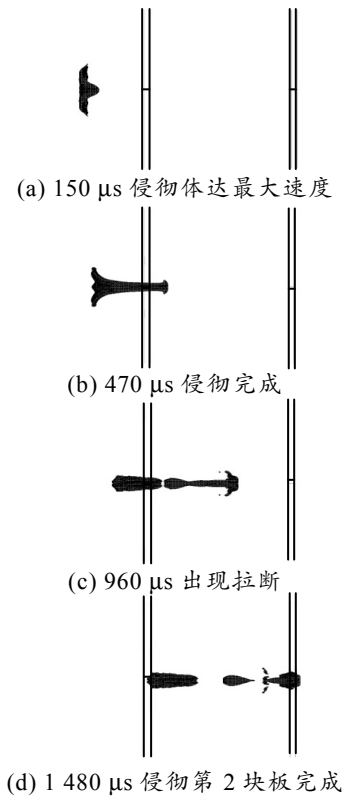


图 4 杆式侵彻体形成过程

2.4 考核判定

假定战斗部装药直径为 D ，耐压壳模拟靶直径为 d ，设置考核判定标准为爆炸成型侵彻体能侵彻潜艇非耐压壳模拟靶、水介质装甲和耐压壳模拟靶且满足 $d > \frac{D}{3}$ 。仿真试验结果为 $d = 0.35D$ ，表明战斗部满足考核判定要求。

3 计算稳定性与并行效率

3.1 计算稳定性

用 LS-DYNA 进行聚能战斗部侵彻水介质装甲的仿真计算中，经常会出现因计算不稳定导致中途退出的问题。提示信息包括：速度超出范围 (out-of-range velocities)、体单元负体积 (negative volume in brick element) 或因质量增加而终止 (termination due to mass increase)。在材料属性和单位制等参数设置无误的情况下造成此问题的主要原因是网格质量不高和时间步长过大。

可以尝试的解决方法为：1) 缩短计算时间；2) 减小时间步缩放系数；3) 重新划分质量更高的网格；4) 尝试用双精度版本计算等。

3.2 并行效率

在计算量较大时经常需要采用多 CPU 并行计算，并行效率问题是十分重要的问题。并行计算方

式分为共享内存处理方式 (shared memory processing, SMP) 和基于集群的大规模并行处理 (massive parallel processing, MPP) 方式。最大理想加速比 S_m 定义为：

$$S_m = \frac{1}{f_s + \frac{f_p}{N}} \quad (6)$$

其中： N 为并行计算中使用的 CPU 数； f_p 为并行计算执行百分比； f_s 为串行计算执行百分比。

表 1 所示为不同并行计算执行百分比下 CPU = 2,4,8,16 时的最大理论加速比。聚能战斗部侵彻水介质装甲仿真的并行计算实际加速比与计算机硬件配置有关，CPU 主频越高，内存越大，计算效率越高，但实际加速比通常小于最大理论加速比^[7]。

表 1 最大理论加速比

并行执行百分比/%	CPU			
	N=2	N=4	N=8	N=16
86	1.75	2.82	4.04	5.16
92	1.85	3.23	5.13	7.27
96	1.92	3.57	6.25	10.00
100	2.00	4.00	8.00	16.00

4 结论

1) LS-DYNA 软件的 ALE 算法适于进行鱼雷聚能战斗部侵彻模拟靶仿真试验研究，但需要高质量网格来提高计算稳定性，增强计算机配置来提高并行计算效率。

2) 采用的聚能战斗部产生的杆式侵彻体径向尺寸适中，受拉伸断裂形成多段侵彻体，水中侵彻过程速度衰减较慢，毁伤效果满足考核标准。

3) 高精度仿真试验得到的射流速度、形状、侵彻孔径等参数可以为考核和评估鱼雷聚能战斗部的毁伤效果提供参考。

参考文献：

- [1] 王团盟, 向春. 鱼雷聚能战斗部 EFP 侵彻潜艇结构模拟靶数值模拟[J]. 鱼雷技术, 2008, 16(1): 44-47.
- [2] 杨世昌. EFP 侵彻水介质靶板机理仿真研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [3] 凌荣辉, 钱立新, 唐平, 等. 聚能型鱼雷战斗部对潜艇目标毁伤研究[J]. 弹道学报, 2001, 13(2): 23-27.
- [4] 李成兵, 沈兆武, 裴明敬. 结构参数影响聚能杆式弹丸成型的数值模拟[J]. 工程爆破, 2007, 13(1): 6-11.
- [5] 王海福, 江增荣, 李向荣. 药型罩参数对聚能装药水下作用效应的影响[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(5): 405-409.
- [6] 刘建青, 顾文彬, 唐勇, 等. 变壁厚球缺罩爆炸成型弹丸成型性能的数值模拟[J]. 解放军理工大学学报, 2008, 9(2): 172-176.
- [7] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Theoretical Manual[Z]. Livermore, California: Livermore Software Technology Corporation, 2003.