

爆炸成型模拟弹丸对水介质侵彻的数值仿真*

杨 莉,张庆明,时党勇

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081)

摘 要:应用大型有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA,对爆炸成型模拟钢弹丸侵彻水介质进行了数值仿真计算,分析了形状和入水速度对弹丸侵彻性能的影响,给出了弹丸水中运动速度衰减规律,为下一步设计能形成较好水下弹道特性和侵彻效果的鱼雷战斗部装药结构提供参考。

关键词:爆炸力学;数值模拟;爆炸成型弹丸;侵彻

中图分类号:TJ410.33;O383.1 文献标志码:A

Numerical Simulation for the Penetration of Explosively Formed Projectile into Water

YANG Li,ZHANG Qingming, SHI Dangyong

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

Abstract: The penetration process of an explosively formed projectile simulation into water is conducted by using the large-scale finite element analysis software ANSYS/LS-DYNA. The influences of shape and velocity of projectile on penetration is analyzed. The velocity decrease of projectile moving in the water is also studied. Some valuable advices are given for the design of the shape charge configuration of torpedo warheads which have good underwater trajectory characteristics and terminal effect.

Keywords: mechanics of explosion; numerical simulation; explosively formed projectiles; penetration

0 引言

随着高新技术的迅猛发展及其在舰艇材料选择和结构设计方面的应用,大大增加了潜艇的下潜深度和抗爆能力,使得传统的爆破型鱼雷战斗部对其难以奏效。为此,世界各国海军相继研制了破甲能力强、爆炸威力大的聚能型鱼雷战斗部,提高了鱼雷的毁伤效果。

聚能型鱼雷战斗部对典型水下目标结构的毁伤效果主要取决于其产生的爆炸成型弹丸在水中的运动特性和侵彻能力。根据流体动力学理论和现有实验结果,具有良好外形和较高入水速度的弹丸,水中运动阻力和质量损失小,贯穿水介质能力强^[1]。文中应用大型有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA 进行了不同形状钢模拟爆炸成型弹丸(EFP)对水介质侵彻过程的数值

仿真计算,分析了弹丸形状和入水速度对 EFP 侵彻水介质的影响,为下一步鱼雷战斗部装药结构的优化设计提供了支持。

1 仿真模型建立

文中采用 20# 钢模拟 76mm 口径药型罩产生爆炸成型弹丸以不同初速侵彻水介质的情况。根据截卵型罩和亚半球型罩两种药型罩结构设计了头部密实的短粗弹丸(1# 弹丸)和亚球形弹丸(2# 弹丸),且保证模拟弹丸和实际 EFP 的材料相同、质量相等。模拟弹丸的结构尺寸如图 1 所示。

计算模型由弹丸和水两部分组成,弹丸和水之间采用 ALE 耦合算法。弹丸采用拉格朗日网格建模,选用实体单元(solid164),材料本构关系选用 Johnson/Cook 模型。水介质采用欧拉网格

* 收稿日期:2008-03-19

作者简介:杨莉(1979-),辽宁锦州人,博士研究生,研究方向:高效毁伤战斗部技术。

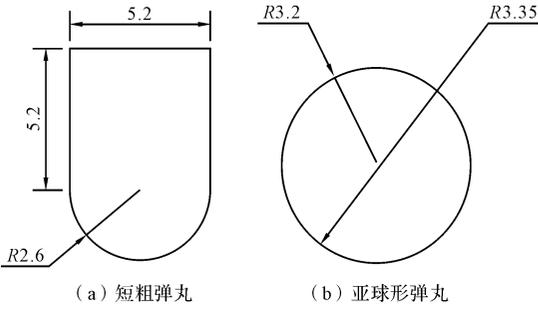


图 1 钢模拟爆炸成型弹丸结构尺寸图

建模,四周为无反射扰动的透射传播边界,空材料模型,状态方程选用 Gruneisen 模型:

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu [1 + (1 - \frac{\gamma_0}{2})\mu - \frac{a}{2}\mu^2]}{[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}]^2} + (\gamma_0 + a\mu)E$$

其中: E 为介质初始条件下单位体积的内能, C 为 $\mu_s - \mu_p$ 曲线的截距, S_1, S_2, S_3 是 $\mu_s - \mu_p$ 曲线斜率的系数, a 是 γ_0 的一阶体积修正, γ_0 是 Gruneisen 常数, $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ 。这里各参数分别取 $\rho_0 = 1 \text{ g/cm}^3, \mu = 0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s}, C_0 = 1.489 \text{ km/s}, S_1 = 1.79, \gamma_0 = 1.65$,未给出的参数取 LS-DYNA 的默认值。

2 仿真结果与分析

弹丸的形状和速度是影响弹丸水中侵彻能力的重要参数,文中对不同形状和入水速度的弹丸进行了数值模拟,计算了弹丸水中运动的速度衰减规律。

2.1 弹丸侵彻水介质速度衰减规律

由图 2 可见,具有一定初速度的弹丸开始入水阶段,速度衰减快,水中运动一段距离后,速度衰减变得缓慢而平滑。从图 3 也可以看出,水中运动的弹丸头部要变形变粗,运动阻力增加,运动速度成指数倍降低。

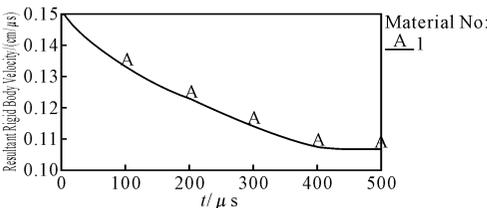


图 2 2# 弹丸侵彻水介质速度随时间衰减曲线

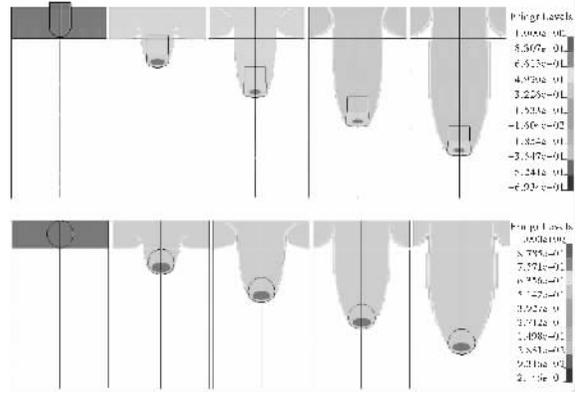


图 3 弹丸水中运动过程图

根据理论分析和数值模拟结果可以拟合出弹丸在水介质中的运动方程^[2]。

设密度为 ρ_m 的弹丸,以速度 u_x 在粘滞系数为 μ 的牛顿流体中运动,弹丸正面受到阻力 F 。为简化计算模型,假设弹丸为表面光洁的轴对称回转体,忽略重力作用,且不考虑空泡阻力和温度的影响,则根据动量方程和牛顿第二定律有:

$$F dt = m u_x \quad (1)$$

$$F = -M du_x / dt \quad (2)$$

式中: M 为弹丸质量, m 为 dt 时间内作用于弹丸头部正面的液体质量。

设弹丸长度为 L ,有效截面积为 S ,则:

$$M = \rho_m SL \quad m = \rho S dx \quad (3)$$

其中 ρ 为水介质密度。

由于弹丸在运动过程中受到水介质作用而发生形状改变,设其长度和有效截面积满足线性变化关系:

$$L = L_0 (1 + \alpha x) \quad S = S_0 / (1 - \alpha x) = S_0 (1 + \beta x) \quad (4)$$

式中: α 为弹丸头部位置, L_0 和 S_0 为弹丸的初始长度和头部截面积, β 为负值。

将式(2)代入式(1)得到 $-M \frac{du_x}{dt} dt = m u_x$, 即:

$$-M \frac{du_x}{u_x} = m \quad (5)$$

将式(3)和式(4)代入式(5),可得 $\frac{du_x}{u_x} = -\frac{\rho S_0}{\rho_m L_0 S'_0} \frac{(1 + \beta x)}{(1 + \alpha x)} dx$, 即:

$$\frac{du_x}{u_x} = -\frac{\rho S_0}{\rho_m L_0 S'_0} (1 + \alpha x + \beta x^2 + \dots) dx \quad (6)$$

当 $x = 0$ 时, $u_0 = u_x, L = L_0$, 积分求解:

$$u_x = u_0 \exp(-Ax - Bx^2 + Cx^3) \quad (7)$$

根据图 3 拟合曲线可求得 $A = 0.740, B = 0.179, C = 0.784$, 即得到弹丸在水介质中任意点处的速度公式:

$$u_x = u_0 \exp(-0.74x - 0.179x^2 + 0.784x^3) \quad (8)$$

2.2 弹形弹速对弹丸侵彻水介质能力的影响

根据图 4 和图 5 可知, 具有相同入水初速度的短粗弹丸对水介质的侵彻深度大于亚球形弹丸的侵彻深度, 且贯穿相同厚度水层后, 短粗弹丸的剩余速度高于亚球形弹丸的剩余速度, 其后续破甲效果更好。对于入水速度 1500m/s 的亚球形弹丸, 贯穿 0.5m 厚水层后, 剩余速度为 1075m/s, 速度损失约为 28%。

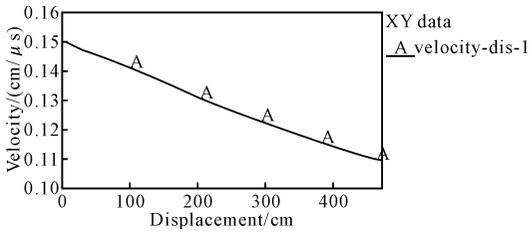


图 4 1# 弹丸侵彻水介质速度-距离变化曲线

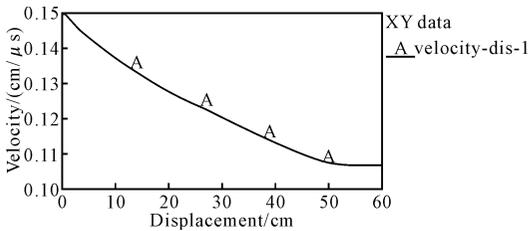


图 5 2# 弹丸侵彻水介质速度-距离变化曲线

根据流体力学理论, 弹丸在水下高速运动过程中受到水的摩擦阻力、涡流阻力和空泡阻力的

共同作用, 使得弹丸速度衰减很快, 而且速度降低的程度和弹丸入水速度密切相关, 弹丸入水速度越大, 速度衰减越快^[2]。根据得到的数值模拟结果, 水介质对弹丸有一定的侵蚀磨损作用, 当入水速度过高时, 弹丸会发生变形甚至碎裂脱落, 甚至丧失侵彻能力。

3 结语

ANSYS/LS-DYNA 作为功能齐全的显示动力学有限元分析软件, 可以模拟各种复杂的流固耦合非线性动力学问题, 为爆炸成型弹丸的研究和设计提供较为可靠和详尽的数值依据。文中通过选取典型的长径比为 1.5 的短粗爆炸成型弹丸和亚球形弹丸分别进行数值仿真计算, 得到了不同形状和入水速度的钢模拟爆炸成型弹丸侵彻水介质的基本规律。结果表明, 侵彻相同厚度水层时, 短粗弹丸比亚球形弹丸速度损失小, 存速能力强, 有利于弹丸后续侵彻; 对于同种材料和形状的模拟弹丸, 入水速度越高, 弹丸头部磨损变形越大, 速度衰减越快。

根据文中的数值模拟结果, 对于攻击潜艇等水下目标的 EFP 战斗部, 应采用能形成较好水下弹道特性和侵彻效果的装药结构和弹丸材料, 使其在水介质运动过程中阻力和质量损失最小, 为后续侵彻装甲靶板奠定基础。

参考文献:

- [1] 叶本治, 冯民贤. 射弹在水介质中的运动规律及破甲效果[J]. 爆轰波与冲击波, 1993(4): 16-22.
- [2] J G 沃, G W 斯塔布斯塔德, 水弹道学模拟[M]. 陈九锡, 张开荣, 译. 北京: 国防工业出版社, 1979.