

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2015.06.014

基于 AUTODYN 的潜艇典型舱段水中爆炸冲击损伤研究*

姜涛 王桂芹 詹发民 周方毅

海军潜艇学院防险救生系(山东青岛,266071)

[摘 要] 针对双层壳体潜艇在鱼雷等水中兵器爆炸作用下壳体的变形及破损问题,采用 AUTODYN 有限元软件,分析了潜艇典型舱段,在鱼雷接触命中及爆距分别为 2、4、6 m 条件下,双层壳体潜艇的壳体破口及变形。计算结果表明,潜艇在鱼雷接触命中条件下,耐压及非耐压壳体均出现较大破口,且耐压壳体破口范围更大;在鱼雷 2 m 爆距条件下,潜艇耐压壳体出现较大破口,非耐压壳体出现较大塑性变形;在鱼雷 4、6 m 爆距条件下,耐压及非耐压壳体均有较大塑性变形。

[关键词] 水中爆炸;潜艇;毁伤

[分类号] TJ410.3+3

引言

随着炸药性能的不不断提升和水中兵器制导技术的发展,人们对舰艇的抗冲击性能的要求越来越高。战争条件下,鱼雷是潜艇可能遭受其攻击的最主要的水中兵器之一。鱼雷战斗部一般装有触发引信和非触发引信。在鱼雷接触爆炸条件下,潜艇壳体很难保存完整,潜艇壳体出现大面积的破口;在非接触命中条件下,潜艇壳体出现较大程度的塑性变形。舰艇的抗冲击研究以水中爆炸试验研究、理论研究和数值计算仿真研究等手段为主,其中有限元数值计算方法逐渐成熟,成为了舰艇抗冲击研究的重要手段。目前国内开展了加筋板壳体的毁伤模式研究^[1]、接触及非接触爆炸条件下潜艇结构的响应研究^[2]和接触爆炸条件下潜艇双层壳体毁伤研究^[3]等。

本文侧重于研究潜艇双层壳体在接触及近炸条件下,耐压和非耐压壳体毁伤的比较,对开展单双层壳体潜艇的设计论证工作具有一定的指导意义。

1 材料模型

水的状态方程采用多项式状态方程描述。

压缩时($\mu > 0$):

$$p = a_1\mu + a_2\mu^2 + a_3\mu^3 + (b_0 + b_1\mu)\rho_0 e; \quad (1)$$

膨胀时($\mu \leq 0$):

$$p = T_1\mu + T_2\mu^2 + b_0\rho_0 e. \quad (2)$$

式(1)和式(2)中: $\mu = \rho/\rho_0 - 1$, ρ_0 为材料的初始密度; ρ 为材料密度;系数 a_1 、 a_2 、 a_3 、 b_0 、 b_1 由试验

拟合数据得到, $a_1 = 2.20$ GPa, $a_2 = 9.54$ GPa, $a_3 = 14.6$ GPa, $b_0 = 0.28$, $b_1 = 0.28$ ^[4]。 $T_1 = 2.2$ GPa; $T_2 = 0$ ^[1]; e 为水的内能。

空气采用理想气体状态方程描述:

$$p = (\gamma - 1)\rho e. \quad (3)$$

式中: $\rho = 1.225 \times 10^{-3}$ g/cm³; γ 为绝热指数, $\gamma = 1.4$; e 为比内能, $e = 2.067 \times 10^5$ kJ/kg^[5]。

高能炸药单元材料模型采用 JWL 状态方程:

$$p = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V})e^{-R_1 V} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V})e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V}. \quad (4)$$

对于 TNT 炸药, $A = 373.8$ GPa, $B = 3.747$ GPa, $\omega = 0.35$, $R_1 = 4.15$, $R_2 = 0.9$, 分别为 JWL 方程参数,爆轰产物的内能 $E = 6.0 \times 10^9$ J/m³, V 表示爆轰产物的体积^[6]。

钢板材料为 AUTODYN 自带 S4340 钢材料参数:密度 $\rho = 7.8$ g/cm³,泊松比 $\mu = 0.248$,杨氏模量 $E = 210$ GPa,屈服应力 $\delta = 0.58$ GPa^[6]。材料侵蚀失效模式中侵蚀应变取 0.15。

采用 Grüneisen 状态方程,材料冲击压缩时:

$$p = \frac{\rho_0 c^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + \alpha\mu)E; \quad (5)$$

* 收稿日期:2014-01-08

作者简介:姜涛(1979~),男,博士,讲师,主要从事水下爆破的研究。E-mail:374375340@qq.com

材料膨胀时为:

$$p = \rho_0 c^2 \mu + (\gamma_0 + \alpha \mu) E. \quad (6)$$

式(5)和式(6)中: ρ_0 为材料密度; $\mu = (1/V_a) - 1$, V_a 为当前空气的相对体积; c 是 $u_s - u_p$ (冲击波速度-质点速度) 曲线的截距; $S_1 = 1$ 、 $S_2 = 0$ 和 $S_3 = 0$ 分别是 $u_s - u_p$ 曲线斜率的系数; $\gamma_0 = 1.9$, 是伽马系数; $\alpha = 0$, 是对 γ_0 的一阶体积修正; $E = 0.5 \times 10^9 \text{ J/m}^3$, 为材料的内能。另外, 计算时不需要输入 μ , 只需要输入初始物质的初始相对体积 V_0 , 本算例中从最初状态算起, 取 $\mu = 1$ 。

2 有限元模型的建立

为了计算双层壳体潜艇在鱼雷命中条件下的壳体毁伤, 建立了不同工况条件下, 双层壳体潜艇在鱼雷装药爆炸的毁伤模型。建立的有限元物理模型包括潜艇耐压壳体、非耐压壳体、空气、水、炸药 5 部分, 如图 1 所示。

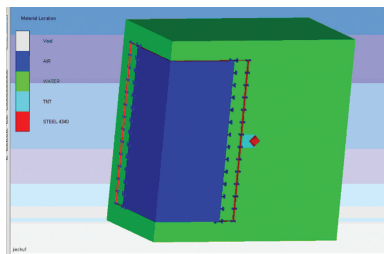


图 1 接触爆炸条件下有限元模型

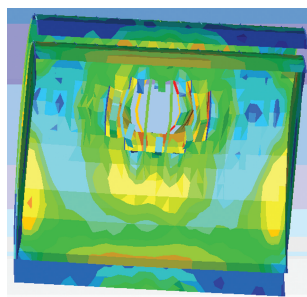
Fig. 1 FEM model in contact explosion

建立的流体域尺寸为 $500 \text{ cm} \times 1\,000 \text{ cm} \times 1\,000 \text{ cm}$, 潜艇典型舱段模型耐压壳体直径 300 cm , 非耐压壳体直径 400 cm , 舱段长 800 cm 。耐压壳体厚度 2.8 cm , 非耐压壳体厚度 1.0 cm 。根据鱼雷引信的作用方式及作用距离, 分别计算鱼雷接触命中、鱼雷与潜艇非耐压壳体爆距 $2, 4, 6 \text{ m}$ 条件下鱼雷战斗部装药爆炸, 潜艇壳体的损伤。

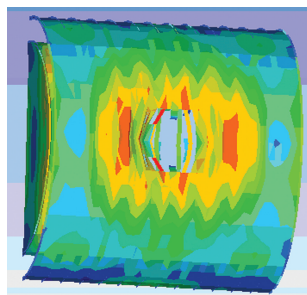
模型中水介质与炸药采用 Euler 域, 空气采用拉格朗日单元, 潜艇壳体为 Shell 单元, 壳体上的肋骨采用 Beam 单元。装药为圆柱形, 直径 52 cm , 长 74 cm , 装药量为 400 kg , 装药种类为 TNT (模拟 400 kg TNT 当量装药)。Euler 网格单元尺寸为 10 cm , 拉格朗日单元网格尺寸为 30 cm , 保证 Euler 单元网格尺寸小于拉格朗日单元网格尺寸。壳体与流体之间采用全耦合算法, 其中耦合厚度设定为 30 cm (不小于 2 倍流体网格尺寸)。耐压壳体与空气介质共节点。

鱼雷接触命中、鱼雷与潜艇非耐压壳体爆距 $2, 4, 6 \text{ m}$ 4 种工况条件下, 鱼雷战斗部装药爆炸, 潜艇壳体损伤如图 2 ~ 图 5 所示。

数值计算结果表明, 接触爆炸条件下, 潜艇的耐压壳体及非耐压壳体均出现不同程度破口; 在非耐压壳体上破口直径为 1.2 m ; 在耐压壳体上破口直径为 2.4 m 。耐压壳体出现的破口范围要明显大于



(a) 耐压壳体



(b) 非耐压壳体

图 2 接触爆炸条件下潜艇壳体损伤情况

Fig. 2 Damage of the submarine hull in contact explosion

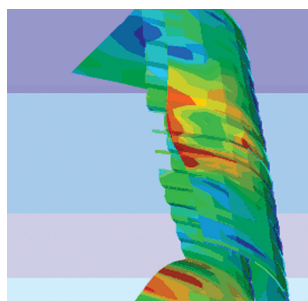


图 3 2 m 爆距条件下潜艇壳体损伤情况

Fig. 3 Damage of the submarine hull with stand off distance of 2 m

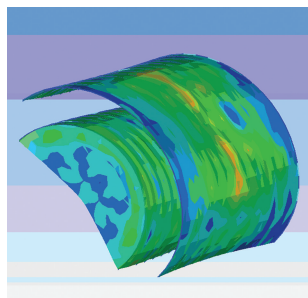


图 4 4 m 爆距条件下潜艇壳体损伤情况

Fig. 4 Damage of the submarine hull with stand off distance of 4 m

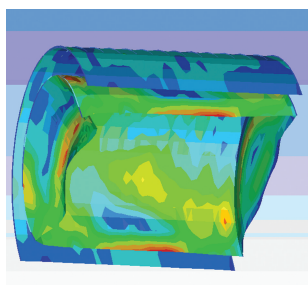


图 5 6 m 爆距条件下潜艇壳体损伤情况

Fig. 5 Damage of the submarine hull with stand off distance of 6 m

非耐压壳体上出现的破口范围(图 2)。在装药中心与潜艇非耐压壳体 2 m 距离条件下,潜艇耐压壳体出现直径 2 m 破口,而非耐压壳体出现较大范围塑性变形,未形成破口损伤(图 3)。在装药中心与潜艇非耐压壳体 4、6 m 距离条件下,潜艇耐压壳体与非耐压壳体的迎爆面均未出现较大破口,但均出现了加大范围的塑性变形,同时在舱室密封隔板处出现较大程度塑性变形(图 4、图 5)。

3 结果分析

之所以耐压壳体出现破口,而非耐压壳体未形成破口,是由于耐压壳体背衬空气介质,而非耐压壳体背衬水介质,钢板背衬介质为水时,水介质对钢板的阻碍作用限制了钢板的变形,使之与钢板背衬空气介质相比,更加难以形成破口。

与背衬空气介质不同,钢板背衬水介质时,在爆炸造成对钢板穿孔的过程中,与钢板接触的一定范围内的水一同与破坏部分参与了运动。

水中接触爆破,获得运动速度的水的范围如图 6 所示^[7]。

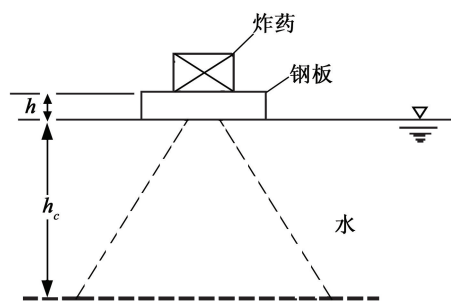


图 6 水获得运动速度的范围

Fig. 6 Range of movement water

根据试验得出, $h_c = 20h$, (h 为钢板厚度)^[7]。当 $h_c/h = 20$ 时,爆破钢板使钢板获得与背衬空气中同样大小冲量,需要的冲量为:

$$1 + \frac{\rho_c h_c}{\rho h} = 3.56. \quad (7)$$

式中: ρ 为钢板密度, kg/m^3 ; ρ_c 为水的密度, kg/m^3 。

这表明:装药在空气中,目标一面与装药接触,另一面与水接触时,爆破需要的药量是在空中接触爆破所需药量的 3.56 倍,详细推导见文献[7]。

公示(7)推导的是装药在空气中爆炸的情形。但是公式推导过程中,并未涉及炸药放置的介质条件。所以,炸药放在水中,在冲击波作用下,钢板背衬水介质和钢板背衬空气介质,破坏其需要的冲量关系也应为 3.56 倍。关于炸药在不同介质中,爆破钢板的装药量在本文未予研究。所以,即使耐压壳体距离爆炸中心点更远,厚度更厚,由于其背衬空气介质,所以在水中爆炸冲击波作用下,在一定的条件时,耐压壳体较非耐压壳体更易破损形成破口,或是其形成的破口范围较之非耐压壳体更大。

4 结束语

应用 AUTODYN 有限元数值计算软件,分析了双层壳体潜艇在鱼雷接触命中及非接触命中条件下潜艇壳体的毁伤效果。

分析结果表明,双层壳体潜艇在鱼雷接触爆炸条件下,耐压壳体及非耐压壳体均出现较大破口,且耐压壳体出现的破口要大于非耐压壳体的破口;在爆距 2 m 的条件下,由于耐压壳体背衬空气,非耐压壳体背衬海水,耐压壳体出现较大程度破口,而非耐压壳体仅出现较大程度变形;在爆距 4 m 及以上爆距条件下,耐压壳体及非耐压壳体均出现较大范围塑性变形,舱室密封隔板处出现的塑性变形程度更为严重。经分析,在爆炸冲击波作用下,钢板背衬水介质和钢板背衬空气介质,破坏其需要的爆炸冲击波冲量关系应为 3.56 倍。

参 考 文 献

- [1] 张振华,王乘,朱锡,等. 潜艇艇体结构在水下爆炸冲击载荷作用下损伤研究[J]. 振动与冲击, 2005, 24(5): 81-85.
ZHANG Z H, WANG C, ZHU X, et al. Damage analysis of submarine structure subjected to underwater blast loading[J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(5): 81-85.
- [2] 刘兴永,朱枫,计方. 单双壳体潜艇冲击响应对比研究[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(9): 45-47, 50.
LIU X Y, ZHU F, JI F. Comparison research on impulsive response between a single-hull and double-hull submarine[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2010, 29(9): 45-47, 50.
- [3] 吴亚军,周鹏,雷晓莉. 水下爆炸对双壳体结构破坏的数值研究[J]. 鱼雷技术, 2008, 16(4): 10-14.
WU Y J, ZHOU P, LEI X L. Numerical simulation of double-layer plate structure destroyed by underwater con-

- tact explosion[J]. Torpedo Technology, 2008, 16(4): 10-14.
- [4] 刘科种, 徐更光, 辛春亮, 等. AUTODYN 水下爆炸数值模拟研究[J]. 爆破, 2009, 26(3): 18-21.
LIU K Z, XU G G, XIN C L, et al. Research on numerical simulation in underwater explosion by AUTODYN[J]. Blasting, 2009, 26(3): 18-21.
- [5] 肖秋平, 陈网桦, 贾宪振, 等. 基于 AUTODYN 的水下爆炸冲击波模拟研究[J]. 舰船科学技术, 2009, 31(2): 38-43.
XIAO Q P, CHEN W H, JIA X Z, et al. Numerical study of underwater explosion shock wave based on AUTODYN [J]. Ship Science and Technology, 2009, 31(2): 38-43.
- [6] 姜涛, 由文立, 张可玉, 等. 水中爆炸表面空穴的理论研究[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(1): 19-24.
JIANG T, YOU W L, ZHANG K Y, et al. Study on the theory of bulk cavitation from underwater explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(1): 19-24.
- [7] 姜涛, 詹发民, 周方毅, 等. 水中钢板爆破水介质对装药量的影响[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(1): 89-93.
JIANG T, ZHAN F M, ZHOU F Y, et al. Effects of water medium on charge mass for demolishing steel plate underwater explosion [J]. Explosion and shock waves, 2015, 35(1): 89-93.

Impact Damage Analysis of Typical Submarine Compartment Subjected to Underwater Blasting Based on AUTODYN

JIANG Tao, Wang Guiqin, ZHAN Famin, ZHOU Fangyi

Rescue Department, PLA Navy Submarine Academy (Shandong Qingdao, 266042)

[ABSTRACT] The damage and deformation of submarine with double shell, in underwater blasting by underwater weapon such as torpedo, were studied based on AUTODYN. For typical submarine compartment, damage and deformation of the submarine hull in explosion hit contact and with standoff distance of 2, 4, 6 m were analyzed. The results show that the shell appears crevasse damage while torpedo contacts blast, the pressure hull appears crevasse and no-pressure hull presents plastic deformation while distance is 2m from the explosion source, and the pressure hull and no-pressure hull has plastic deformation while distance is 4m and 6m from the explosive.

[KEY WORDS] underwater explosion; submarine; damage

声 明

1、本刊对发表的文章拥有出版电子版、网络版版权,并拥有与其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬已包含以上费用。

2、本刊文章版权所有,未经书面许可,不得以任何形式转载。

《爆破器材》编辑部