战斗部整体侵彻Z型舰船结构模拟靶力学特性研究

杜志鹏^{1*}, 张小强², 高鹏^{1,3}, 李营², 张磊¹

1. 海军研究院, 北京 100161;

2. 北京理工大学先进结构技术研究院, 北京 100081;

3. 沈阳工业大学机械工程学院, 沈阳 110870

*联系人, E-mail: duzp7755@163.com

收稿日期: 2020-09-15; 接受日期: 2020-12-29; 网络出版日期: 2021-10-25

摘要 反舰导弹战斗部必须进入舰船内部一定深度爆炸才能达到毁伤效果, 但舰船结构钢板纵横交错, 对战斗部造成远比平行靶复杂的受力特性. 为了研究战斗部侵彻舰船复杂结构的力学特性问题, 将舰船复杂结构简化为一种Z型组合靶板, 利用动量定理分析了战斗部以复杂姿态侵彻Z型靶板时的受力特性, 基于Timoshenko梁理论推导了战斗部的运动方程并得出理论解, 利用LS-DYNA软件仿真分析了战斗部侵彻Z型靶板各阶段的姿态变化和力学特性. 分析结果表明, 战斗部侵彻Z型靶板受到横向载荷比平行靶板高出约2–3倍, 战斗部运动姿态也发生显著改变, Z型靶板比平行靶板更能反映舰船复杂结构特性, 可为战斗部侵彻试验靶标设计提供参考.

关键词 战斗部侵彻, Z型靶板, 力学特性

PACS: 46.55.+d, 62.20.Dc, 45.40.Bb

1 引言

反舰导弹通常装有几百公斤重的半穿甲爆破型战斗部, 可以几百米每秒的速度击中舰船. 战斗部能利用自身巨大的动能, 穿透外板进入舰船内部一定深度爆炸, 依靠爆炸产生的冲击波、破片、准静态超压载荷对爆点周围十几米范围内的舱室造成严重破坏, 并引发火灾、进水等二次灾害. 为了提高生命力, 舰船重要舱室都布置在内部不易受攻击的位置. 要想达到最佳毁伤效果, 战斗部必须能侵彻多层舱室结构, 进入舰船更深的位置起爆. 舰船结构纵横交错、筋板混杂, 还有大量的设备和管路. 这就要求战斗部具有对复杂

靶板侵彻的能力.

战斗部侵彻靶板的研究由来已久. 1984年, 钱伟长^[1]总结了国内外的大量研究成果, 阐明了各种侵彻和穿甲问题. 对于反舰导弹战斗部侵彻舰船结构板架问题来说, 主要是低速、大质量弹体侵彻薄靶板问题. 对其研究方法主要分为3类: 穿甲试验数据经验公式分析法、力学理论分析法、数值仿真法. 在试验方面, 段卓平^[2]以弹径105 mm截卵形战斗部对均质靶板和加筋板进行垂直和倾斜穿甲试验, 得到了战斗部侵彻剩余速度计算公式. 朱锡等人^[3]用半穿甲弹对均质钢板、组合结构钢靶板和复合钢靶板以3种入射角度进行穿甲实验, 得出不同形式的钢靶板抗半穿甲弹的特性.

引用格式: 杜志鹏, 张小强, 高鹏, 等. 战斗部整体侵彻Z型舰船结构模拟靶力学特性研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 124608
Du Z P, Zhang X Q, Gao P, et al. Research on the mechanical characteristics of the Z-type target plate of the warhead entirely penetrating the ship simulation structure (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 124608, doi: [10.1360/SSPMA-2020-0360](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0360)

在理论方面, Landkof和Goldsmith^[4]提出战斗部对薄靶板侵彻理论模型, 包含靶板的塑形铰运动和花瓣开裂弯曲两部分. 杜志鹏等人^[5]进一步对Landkof的理论进行了修正, 引入Cowper-Symonds本构考虑高速侵彻材料应变率强化效应. Xu等人^[6]基于能量守恒原理, 推导了战斗部斜侵彻薄板花瓣穿孔理论模型, 提出斜侵彻过程中战斗部动能主要通过靶板变形、花瓣张开动能、花瓣裂纹开展和弯曲的应变能吸收. 张振华等人^[7]依据广义Hamilton变分原理推导了花瓣弯曲运动模式, 提出花瓣开裂后的弯曲能和撕裂能理论模型. Zhao^[8]提出梁和板在冲击载荷下的新型无量纲数, 能够考虑有限变形、应变率和横向剪切效应.

在仿真方面, LS-DYNA等商业软件对战斗部侵彻这种相对低速的碰撞侵彻算法已经比较成熟, 研究人员得以将精力集中于侵彻过程力学特性的研究. 侯海量等人^[9]提出了低速大质量球头战斗部侵彻薄板的塑形动力学理论模型, 并根据有效塑形应变失效准则, 分析了薄板穿甲破坏准则. 姚熊亮等人^[10]利用建模仿真方法分析了战斗部侵彻多层靶板的剩余速度、姿态角度和靶板破口等, 据此提出了基于舰船结构特征的等效靶标系统. 吴翰林等人^[11]运用LS-DYNA数值模拟得到了分体式侵彻体斜侵彻14 mm单层圆钢靶的弹道变化规律. 刘雨佳等人^[12]通过数值仿真, 提出前舱物对低速大质量平头弹侵彻金属薄靶的影响. 范群波等人^[13]对圆筒型陶瓷-钛合金-芳纶三单元层复合靶板结构抗弹性能进行了研究.

综上所述, 战斗部要想进入舰船重要部位爆炸需要具有对复杂靶板侵彻的能力, 以往的研究多关注单层加筋板或多层平行靶的侵彻问题. 本文根据舰船结构特点提出一种Z型组合靶板, 就是在两个平行靶之间加一个垂向靶板, 模拟舰船甲板或舱壁, 能够更准确地反映战斗部对复杂靶板侵彻的物理过程. 利用动量定理分析了战斗部侵彻垂向靶板时的受力特性. 基于Timoshenko梁理论推导了战斗部侵彻垂向靶板时的运动方程及其理论解. 利用LS-DYNA软件仿真分析了战斗部侵彻Z型靶板各阶段的姿态变化和力学特性.

2 战斗部受力特性

战斗部穿透舷侧外板进入船体内之后, 将与甲板、舱壁等纵横交叉结构产生多种姿态的碰撞, 如图

1所示. 图1(a)表示战斗部主要的侵彻路径上, 靶板呈现Z型分布. 就是在2个平行靶中间加一个垂直的靶板, 代表舰船的甲板或者横舱壁. 根据舰船的结构尺寸, 这个垂直的靶板代表甲板或者横舱壁, 倾斜入射战斗部有很大概率击中它. 击中后, 由于战斗部轴线与靶板近似平行状态, 战斗部将受到显著的横向碰撞力作用. 这种横向碰撞力会造成战斗部受挤压、剪切、弯矩等载荷.

采用冲量定理分析战斗部侵彻垂直靶板时的受力状态, 如图1(b)所示. 战斗部在以速度 V_0 穿透板厚为 h 的甲板/舱壁过程中, 战斗部受到的横向碰撞力 q 是以速度 V 在战斗部表面移动, 根据几何关系可得 V :

$$V = V_0 \left(\cos\theta + \frac{\sin\theta}{\tan\phi} \right) = V_0 \frac{\sin(\theta+\phi)}{\sin\phi}, \quad (1)$$

式中, θ 为战斗部速度矢量与靶板夹角, ϕ 为战斗部轴线与靶板夹角.

将整个长度为 L 的战斗部切出长度 ΔL 的微元, 分析其受到的横向冲量为

$$I_0 = \rho_b h^2 V_0 \frac{\sin^2\theta}{\sin(\theta+\phi)} \Delta L, \quad (2)$$

式中, ρ_b 为靶板的密度, h 为靶板厚度.

冲量作用持续时间为

$$\Delta t = \frac{\Delta L}{V}. \quad (3)$$

因此战斗部受到的横向碰撞力为

$$q = \frac{I_0}{\Delta t} = \rho_b h^2 V_0^2 \frac{\sin^2\theta}{\sin\phi}. \quad (4)$$

可见, 靶板的密度越大、厚度越大、弹速越高则横向碰撞力越大. 上述横向碰撞力作用于战斗部, 可产生弯矩和剪切力. 为简单分析剪切力在其中的比例, 可假设 ΔL 的微元在 Δt 的时间内受到的横向碰撞力从最大值线性衰减为0. 初始受到的横向碰撞力可使其材料达到剪应力 τ_0 , 则战斗部受到的平均剪切力为

$$\bar{f} = \tau_0 h^2 \frac{\sin\theta}{2\sin(\theta+\phi)}. \quad (5)$$

剪切力与碰撞力之比为

$$\zeta = \frac{\bar{f}}{q} = \frac{\tau_0}{2\rho_b V_0^2} \frac{\sin\phi}{\sin\theta \sin(\theta+\phi)}. \quad (6)$$

按照亚音速反舰导弹战斗部典型参数, 量值区间

图 1 战斗部侵彻 Z 型靶板受力分析示意图. (a) 战斗部侵彻 Z 型靶板示意图; (b) 战斗部横向受力分析

Figure 1 Force analysis of warhead penetrating into Z target. (a) Sketch of warhead penetrating into Z target; (b) warhead transverse force analysis.

的典型值 $\tau_0=100 \text{ MPa}$, $\rho_b=7850 \text{ kg/m}^3$, $V_0=250 \text{ m/s}$ 代入式(6)绘制出剪切力与碰撞力之比随战斗部姿态角度的变化规律, 如图2所示. 可以看出, 作用在战斗部上的剪切力与碰撞力之比超过10%, 且随着战斗部轴线与靶板夹角 ϕ 的增加而增大. 另外, 当战斗部速度 V_0 增大, 达到 800 m/s 以上时, 剪切力所占比例将减小为3%以下, 可以忽略.

3 战斗部应力特性

3.1 简化梁模型

根据战斗部受力分析, 其侵彻 Z 型靶板中的垂直靶板时, 剪切力在其中占有较大比例. 简单的欧拉梁无法考虑剪切, 因此为了分析战斗部动力学特性, 将其简化为两端自由 Timoshenko 梁^[14], 如图3所示. 梁轴线转角为 ω , 梁剪切变形角为 β .

两端自由 Timoshenko 梁在横向碰撞力 $q(x, t)$ 作用下的运动方程为

图 2 (网络版彩图) 剪切力与碰撞力之比随战斗部姿态变化
Figure 2 (Color online) The ratio of shear force to collision force changes with warhead attitude.

图 3 战斗部梁模型示意图

Figure 3 Schematic diagram of warhead beam model.

$$EI \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + k'AG \left[\frac{\partial y}{\partial x} - \omega \right] - \rho I \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} = 0, \quad (7)$$

$$\rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - k'AG \left[\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{\partial \omega}{\partial x} \right] = q(x, t), \quad (8)$$

式中 EI 为梁的弯曲刚度, ω 为弯矩引起的梁截面转角, y 为梁的横向变形, k' 为梁剪切系数, A 为梁横截面积, G 为梁剪切模量, ρ 为梁密度, I 为梁截面惯性距, $q(x, t)$ 为梁所受横向碰撞力. 将横向碰撞力用脉冲函数 δ 表征:

$$q(x, t) = P \cdot \delta(x - Vt), \quad (9)$$

式中, P 为横向碰撞力幅值, δ 为脉冲函数, V 为横向碰撞力在战斗部长度上的运动速度.

为了便于求解梁运动方程, 引入无量纲函数:

$$t_1 = \frac{C_d t}{R_d}, x_1 = \frac{x}{R_d}, y_1 = \frac{y}{R_d},$$

式中, $C_d = \sqrt{E/\rho_d}$ 是战斗部中的纵波速度, $R_d = \sqrt{I/A}$ 是战斗部的等效质点回转半径, 引入无量纲函数后梁方程变为

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial x_1^2} + \frac{1}{\gamma} \left[\frac{\partial y_1}{\partial x_1} - \omega \right] - \frac{\partial^2 \omega}{\partial t_1^2} = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial^2 y_1}{\partial t_1^2} - \frac{1}{\gamma} \left[\frac{\partial^2 y_1}{\partial x_1^2} - \frac{\partial \omega}{\partial x_1} \right] = D \delta \left(x_1 - \frac{V t_1}{C_d} \right), \quad (11)$$

$$\text{式中, } \gamma = \frac{E}{k'G}, D = \frac{P}{\rho_d A C_d^2}.$$

上述微分方程可采用拉普拉斯变换法求解. 引入拉普拉斯变换:

$$Y(x_1, p) = \int_0^\infty y_1(x_1, t) e^{-pt} dt,$$

$$\Omega(x_1, p) = \int_0^\infty \omega(x_1, t) e^{-pt} dt.$$

梁方程简化为

$$\Omega'' + \frac{1}{\gamma} [Y' - \Omega] - p^2 \Omega = 0, \quad (12)$$

$$p^2 Y - \frac{1}{\gamma} [Y'' - \Omega'] = D e^{-\frac{x_1 C_d p}{V}}. \quad (13)$$

上式的通解为

$$Y = C_1 e^{-\lambda_1 x_1} + C_2 e^{-\lambda_2 x_1} + C_3 e^{\lambda_1 x_1} + C_4 e^{\lambda_2 x_1}, \quad (14)$$

$$\Omega = \left(\frac{\lambda_1 - \gamma p^2}{\lambda_1} \right) (C_3 e^{\lambda_1 x_1} - C_1 e^{-\lambda_1 x_1}) + \left(\frac{\lambda_2 - \gamma p^2}{\lambda_2} \right) (C_4 e^{\lambda_2 x_1} - C_2 e^{-\lambda_2 x_1}), \quad (15)$$

其中,

$$\lambda_{1,2} = B p^{1/2} \left[p \pm N \sqrt{p^2 - a^2} \right]^{1/2},$$

$$B = \sqrt{\frac{\gamma+1}{2}}, a = \frac{2}{\gamma-1}, N = \frac{\gamma-1}{\gamma+1}.$$

由于是两端自由梁, 因此两端的应力为0, 无量纲的边界条件为在梁的两端 $x=0$ 和 $x=L$ 处有

$$\frac{Q}{k'AG} = y'_1 - \omega = 0,$$

$$\frac{MR_d}{EI} = \omega' = 0.$$

根据边界条件确定梁运动方程的常数项.

3.2 有限元仿真

力学理论模型虽有助于解释基本力学原理, 但无法求解复杂的工程问题. 为更全面分析战斗部侵彻Z型靶板全过程的受力特性与动力学特性, 采用LS-DYNA对战斗部侵彻Z型靶板进行建模仿真, 如图4所示. 战斗部以30°攻角入射Z型靶, 初始速度为315 m/s. Z型靶板由前后2层平行靶和中间一层垂直靶组成.

战斗部采用BEAM161显式动力学梁单元建立, 为了提高接触碰撞计算精度, 在梁单元外部增加了一层无质量刚性膜. 靶板采用SHELL163四节点显式动力学板单元, 单元厚度方向设置5个积分点. 战斗部和靶板建模仿真参数见表1.

仿真得到战斗部穿透Z型靶板的姿态变化, 可分为4个阶段, 如图5和6所示. 第一阶段, 战斗部穿透第

图4 (网络版彩图)战斗部侵彻Z型靶板示意图

Figure 4 (Color online) Schematic diagram of warhead penetrating Z-shaped target.

表1 战斗部侵彻Z型靶板建模参数

Table 1 Modeling parameters of Z target plate embroidered by combat

战斗部参数名称	取值	靶板参数名称	取值
战斗部长度	1020 mm	厚度	8 mm
战斗部直径	350 mm	小筋尺寸	$\Gamma = \frac{6 \times 26}{6 \times 100}$
战斗部质量	168 kg	大筋尺寸	$T = \frac{8 \times 80}{5 \times 200}$
战斗部壳体厚度	40 mm	材料屈服应力	440 MPa
战斗部壳体弹性模量	200 GPa	材料失效应变	0.49
战斗部梁单元长度	20.4 mm	靶板加筋板单元边长	约5 mm

图 5 (网络版彩图)战斗部穿透Z型靶板仿真结果

Figure 5 (Color online) Simulation results of warhead penetrating Z-target.

图 6 (网络版彩图)战斗部偏转角度与角加速度时域曲线

Figure 6 (Color online) Time domain curve of warhead deflection angle and angular acceleration.

一层靶板: 战斗部以 30° 攻角入射第一层靶板时, 受到靶板阻力造成的角加速度幅值约 $0.5^\circ/\text{ms}$, 持续时间只有约 1 ms . 这时因为战斗部整体通过靶板的时间虽然应该是 2.75 ms , 但头部穿透后, 姿态基本未改变, 因此尾部未与靶板碰撞. 第二阶段, 战斗部穿透第一层靶板后自由飞行. 第三阶段, 战斗部穿透第二层靶板, 受到幅值约 $1.5^\circ/\text{ms}$ 的角加速度, 持续时间约 4 ms , 使战斗部角度改变了约 6° . 这一阶段的特点是战斗部持续受到与靶板碰撞产生的偏转角加速度, 这是因为战斗部与靶板夹角较小, 整个战斗部都与靶板发生了碰撞. 紧接着第四阶段, 战斗部穿透第三层靶板, 受到幅值约 $3.5^\circ/\text{ms}$ 的角加速度, 持续约 1 ms . 这一阶段的特点是角加速度幅值最高, 但持续时间较短, 这是因为战斗

部头部与靶板接近垂直, 而且飞行速度矢量与靶板夹角较大, 由穿透第二层后战斗部偏转造成.

为了进一步分析战斗部受力状态, 将战斗部在侵彻靶板过程中受到的剪力和弯矩绘于图7. 战斗部头部坐标为 0.0 , 尾部为 1.0 m . 图中3条曲线分别为穿透第一、二、三层靶板时战斗部各个横剖面的剪力和弯矩, 取的时刻分别是 0.5 , 8.3 和 11.8 ms . 在战斗部穿透Z型靶板第二层时受到的剪力最大, 约为 5 MN ; 穿透第三层时受到的弯矩最大, 约为 120 MN m ; 战斗部头部 $1/4$ 长度上受到的剪力比其他部位的高出约2倍, 弯矩在整个战斗部上的分布比较均匀.

为了对比战斗部侵彻Z型靶板与侵彻平行靶板的差异, 将Z型靶板的第二层去掉, 其余不变, 再次仿真计算得到战斗部剪力和弯矩分布, 取的时刻是 0.5 和

图 7 (网络版彩图)战斗部侵彻Z型靶板时受到的剪力和弯矩分布. (a) 战斗部各横剖面剪切力; (b) 战斗部各横剖面弯矩

Figure 7 (Color online) Distribution of shear and bending moments received by the warhead when it penetrates the Z-type target. (a) Shear forces across sections of the fighting force; (b) bending moment of each transverse section of the warhead.

图 8 (网络版彩图)战斗部侵彻平行靶板时受到的剪力和弯矩分布. (a) 战斗部各横剖面剪切力; (b) 战斗部各横剖面弯矩

Figure 8 (Color online) The distribution of shear and bending moments received by the warhead when it penetrates the parallel target. (a) Shear forces across sections of the fighting force; (b) bending moment of each transverse section of the warhead.

11.8 ms, 如图8所示. 与Z型靶板情况有2个不同: (1) 战斗部受到的剪力和弯矩都比Z型靶板小, 只有1/3左右; (2) 战斗部穿透2层平行靶受到的力基本相同, 说明战斗部姿态基本不变.

4 结论

我们根据舰船结构特点提出了一种Z型组合靶板, 利用动量定理分析了战斗部侵彻Z型组合靶板中垂向靶板时的受力特性, 基于Timoshenko梁理论推导了战斗部侵彻垂向靶板时的运动方程及其理论解, 利用

LS-DYNA软件仿真分析了战斗部侵彻Z型靶板各阶段的姿态变化和力学特性. 分析结果表明, (1) 战斗部侵彻舰船时, 侧面会碰上靶板, 这时战斗部受横向力较大, Z型靶板能够更好地模拟这种受力特征; (2) 战斗部侵彻Z型靶板的姿态变化可分为4个阶段, 在第三阶段侵彻第二层靶板时发生加速偏转, 使战斗部飞行方向与弹头方向偏离, 侵彻能力下降; (3) 战斗部侵彻Z型靶板时横剖面受到的剪力和弯矩都远大于侵彻平行靶, 峰值可达3倍以上. 本文的侵彻理论模型和仿真计算主要用于定性分析受力特性, 对其准确性的验证以及参数变化规律有待于进一步的研究.

参考文献

- 1 Qian W C. Armor Piercing Mechanics (in Chinese). Beijing: National Defense Industry Press, 1984 [钱伟长. 穿甲力学. 北京: 国防工业出版社, 1984]
- 2 Duan Z P. The experimental and theoretical research for end-point trajectory of warhead penetrating ribbings structural target (in Chinese). Exp Shock Waves, 2005, 25: 547–552 [段卓平. 半穿甲弹丸对加筋靶板侵彻的终点弹道的实验和理论研究. 爆炸与冲击, 2005, 25: 547–552]
- 3 Zhu X, Hou H L. The simulative research on the kinetic armor-piercing effect of semi-armor-piercing missile warhead (in Chinese). J Naval Univ Eng, 2002, 14: 13–19 [朱锡, 侯海量. 防半穿甲导弹战斗部动能穿甲模拟试验研究. 海军工程大学学报, 2002, 14: 13–19]
- 4 Landkof B, Goldsmith W. Petalling of thin, metallic plates during penetration by cylindro-conical projectiles. Int J Solids Struct, 1985, 21: 245–266
- 5 Du Z P, Li X B, Xia L J, et al. Research on the kinetic armor-piercing effect of semi-armor-piercing missile warhead (in Chinese). J Shanghai Jiaotong Univ (Sci), 2006, 10: 1794–1797 [杜志鹏, 李晓彬, 夏利娟, 等. 反舰导弹战斗部动能穿甲花瓣型破坏模型. 上海交通大学学报, 2006, 10: 1794–1797]
- 6 Xu S X, Wu W H, Li X B, et al. Petal failure characteristics of a conical projectile penetrating a thin plate at high oblique angle. J Shanghai Jiaotong Univ (Sci), 2010, 15: 434–440
- 7 Zhang Z H, Zhu X. Petaling of rigid plastic plate under contact explosive loading of cylindrical dynamite (in Chinese). J Ship Mech, 2004, 8: 113–119 [张振华, 朱锡. 刚性塑料板在柱状炸药接触爆炸载荷作用下的花瓣开裂研究. 船舶力学, 2004, 8: 113–119]

- 8 Zhao Y P. Suggestion of a new dimensionless number for dynamic plastic response of beams and plates. *Archive Appl Mech (Ingenieur Archiv)*, 1998, 68: 524–538
- 9 Hou H L, Zhu X, Li W, et al. Numerical analysis of perforation mechanism for a thin plate subjected to impact by hemispherical-nosed projectiles with low velocity (in Chinese). *J Vib Shock*, 2008, 27: 40–45 [侯海量, 朱锡, 李伟, 等. 低速大质量球头弹冲击下薄板穿甲破坏机理数值分析. 振动与冲击, 2008, 27: 40–45]
- 10 Yao X L, Wu Z Q, Wang Z, et al. Study on damage effectiveness of warhead on ship target (in Chinese). *J Harbin Eng Univ*, 2019, 40: 141–145 [姚熊亮, 吴子奇, 王治, 等. 战斗部对舰船靶标侵彻毁伤效能研究. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40: 141–145]
- 11 Wu H L, Qu K P, Shen F, et al. Numerical simulation of ballistic stability of split penetrator penetrating steel target (in Chinese). *Chin J High Pressure Phys*, 2020, 34: 1–6 [吴翰林, 屈可朋, 沈飞, 等. 分体式侵彻体斜侵彻钢靶的弹道稳定性数值模拟. 高压物理学报, 2020, 34: 1–6]
- 12 Liu Y J, Hou H L, Li M, et al. Influence of nose cabin on low speed blunt projectile during penetration of metal plate (in Chinese). *Chin J High Pressure Phys*, 2020, 34: 1–8 [刘雨佳, 侯海量, 李茂, 等. 前舱物对低速大质量平头弹侵彻金属薄板的影响. 高压物理学报, 2020, 34: 1–8]
- 13 Fan Q B, Li P R, Zhou Y, et al. Ballistic performance simulation of cylindrical ceramic/titanium/aramid three-layered composite targets and the under lying mechanism (in Chinese). *Trans Beijing Inst Tech*, 2020, 40: 219–226 [范群波, 李鹏茹, 周豫, 等. 圆筒型陶瓷-钛合金-芳纶三单元层复合靶板结构抗弹性能数值模拟及其内在机理. 北京理工大学学报, 2020, 40: 219–226]
- 14 Jin X D, Xia L J. *Ship Vibration* (in Chinese). Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2011 [金咸定, 夏丽娟. 船体振动学. 上海: 上海交通大学出版社, 2011]

Research on the mechanical characteristics of the Z-type target plate of the warhead entirely penetrating the ship simulation structure

DU ZhiPeng^{1*}, ZHANG XiaoQiang², GAO Peng^{1,3}, LI Ying² & ZHANG Lei¹

¹ *Naval Research Institute, Beijing 100161, China;*

² *Institute of Advanced Structure Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*

³ *School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China*

The anti-ship missile warhead must enter the ship's deep interior in order to achieve the satisfied damage effect. However, the ship's hull is crisscrossed, which results in far more complex mechanical characteristics of the warhead than that of the parallel target. In order to study the mechanical characteristics of warhead penetrating into the complex structure of a real ship, the complex structure of the ship is simplified as a kind of Z-shaped composite target plate, and the mechanical characteristics of the warhead penetrating into the Z-shaped target plate in a complex attitude are analyzed by using the momentum theorem. Based on the Timoshenko beam theory, the motion equation of the combat part is derived and the theoretical solution is obtained. The attitude change and mechanical properties of warhead penetrating into each stage of Z-shaped target are simulated by LS-DYNA software. The analysis results show that the transverse load of the warhead penetrating Z target is about 2–3 times higher than that of the parallel target, and the movement mode of the warhead is also significantly changed. The Z target can better reflect the complex structural characteristics of the ship than the parallel target, and can provide a reference for the design of the warhead penetration test target.

warhead penetrating, Z-type target plate, mechanical characteristics

PACS: 46.55.+d, 62.20.Dc, 45.40.Bb

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0360](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0360)