

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0240

基于耗能模型的超空泡射弹水下 侵彻鱼雷等效关系研究*

严平¹, 赵亚丽¹, 李昕², 魏平¹

(1. 海军工程大学兵器工程学院, 湖北 武汉 430033;

2. 91388 部队, 广东 湛江 524000)

摘要: 超空泡射弹是水下防御技术的研究热点之一。水下毁伤试验费用大, 成本高, 陆上等效试验是一种可能的替代方案。为此需要获得水下超空泡射弹侵彻条件下目标与相关材料的等效关系。以 MK48-5 鱼雷为对象, 构建由壳体 and 14 个关键部件组成的典型鱼雷结构模型。考虑水介质对侵彻的影响, 将水下超空泡射弹侵彻鱼雷的过程分为两个阶段(a. 射弹侵彻水介质和鱼雷壳体, b. 射弹侵彻鱼雷内部关键部件); 建立水介质耗能模型和靶板耗能模型; 依据极限穿透速度等效原则和能量等效原则, 分别得出两个阶段目标和等效靶之间的靶板厚度关系; 为了获得射弹垂直命中鱼雷不同方向及不同工况毁伤效果, 需要对纵向侵彻全雷和横向侵彻鱼雷战雷段、控制段、燃料舱和后舱雷尾 4 个典型舱段分别进行研究; 并基于此建立了水下侵彻和不同工况条件下射弹侵彻鱼雷的多层等效靶模型。

关键词: 侵彻; 鱼雷; 超空泡射弹; 等效关系; 耗能模型

中图分类号: O389; TJ410

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Research on the equivalent relationship of torpedo penetrated by underwater supercavitation projectile based on energy consumption model

YAN Ping¹, ZHAO Yali¹, LI Xin², WEI Ping¹

(1. College of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, Hubei, China;

2. 91388 Troops of PLA, Zhanjiang 524000, Guangdong, China)

Abstract: Supercavitation projectile is one of the research hotspots of underwater defence technology. The cost of underwater damage test is so high that equivalent test on land is considered as a possible alternative. Therefore, it is necessary to obtain the equivalent relationship between the target and related materials under the condition of supercavitating projectile underwater penetration. Taking MK48-5 torpedo as the object, a typical torpedo structure model composed of shell and 14 key components is constructed. Considering the influence of aqueous medium on penetration, the process of underwater supercavitating projectile penetrated torpedo could be divided into two stages: (1) the projectile penetrated the aqueous medium and the torpedo shell, (2) the projectile penetrated key parts of the torpedo. The energy consumption model of aqueous medium and target plate are established. According to the principle of limit penetration velocity equivalence and energy equivalence, the relationship between target and equivalent target in two stages is obtained respectively. In order to obtain the damage effect of projectiles hitting torpedoes vertically in different directions and under different working conditions, it is necessary to study the four typical sections of torpedoe: warhead, control section, fuel tank and torpedo afterbody. Therefore, the multi-layer equivalent target models of underwater penetration and torpedo penetration under different conditions are established.

Keywords: penetration; torpedo; supercavitating projectile; equivalent relation; energy consumption model

* 收稿日期: 2020-07-13; 修回日期: 2021-02-18

第一作者: 严平(1972—), 男, 博士, 副教授, daer2004@sina.com

通信作者: 赵亚丽(1996—), 女, 硕士研究生, 13133010901@163.com

随着鱼雷对舰艇的威胁日益加大,通过火炮发射超空泡射弹实现对鱼雷的毁伤是水下防御技术的研究热点之一^[1]。采用真实目标进行水下毁伤试验的成本很高,陆上等效靶试验是一种可能的替代方案。Farrand 等^[2]讨论了等效靶的定义,基于极限穿透速度等效原则和剩余 RHA 方法建立了等效准则,并给出了 RHA-e 的使用方法。Held 等^[3]将装甲目标等效为一定厚度的均质靶,得出了射流侵彻下部件与均质靶的等效关系。熊冉等^[4]基于剩余穿深等效原则,进行了杆式穿甲弹侵彻下陶瓷和均质钢之间的等效关系数值分析;周捷等^[5]基于极限穿透速度等效原则,研究了小尺寸破片对单兵防护装备的侵彻;曹兵^[6]基于极限穿透速度相等原则,根据弹丸侵彻 45#碳钢板和 603 靶板的实验结果得出了两者之间的等效关系;同时,学者们针对防空反导战斗部、钨合金穿甲弹毁伤反舰导弹的问题,也普遍开展了导弹多层等效靶的研究^[7-9]。

目前等效靶研究主要集中于陆上或空中目标,对水下目标等效关系的研究偏少。已知的主要有:周岩等^[10]基于能量等效原则,提出了船舷结构和均质靶板等效关系的方法,但该研究并未考虑水介质的影响;刘亭等^[11]基于极限穿透速度等效原则,建立了射弹侵彻下鱼水雷与均质钢的等效关系,虽然在等效过程中将水介质考虑在内,但其研究仅限于鱼水雷壳体,且未考虑全雷关键部件的等效模型。

射弹水下侵彻目标与射弹在空气中侵彻目标有较大差异:水中阻力较大不可忽略;射弹水下侵彻靶板时,涉及湍流、多相流、质量转换、非定常和可压缩性等复杂流动机制,水介质的变化较为复杂,会对射弹及靶板造成一定的影响。由于水下毁伤试验过程复杂、耗时长、成本高,若将水介质和鱼雷壳体等效为一层等效靶,有利于大幅度减小威力试验的成本。

为确保射弹对鱼雷造成有效毁伤,要求射弹可以贯穿鱼雷壳体,并击穿其它关键部件。需要考虑射弹对鱼雷内部关键部件的侵彻。本文研究超空泡射弹水下侵彻条件下鱼雷与靶板材料的等效关系,构建一个由壳体和 14 个关键部件组成的典型鱼雷结构模型,结合极限穿透速度等效原则和能量等效原则,并考虑水介质的影响,建立纵向侵彻全雷和横向侵彻鱼雷 4 个典型舱段的水下多层等效靶模型。

1 鱼雷结构模型

构建目标等效靶前,应确定鱼雷的关键部件,结合毁伤模式,建立鱼雷结构模型,本文选择 MK48-5 鱼雷^[12]作为典型对象建立鱼雷结构模型。

MK48-5 鱼雷全雷分为 5 段,从前到后依次为雷顶段、战雷头、控制段、燃料舱和后舱雷尾^[13],其尺寸结构示意图如图 1 所示。

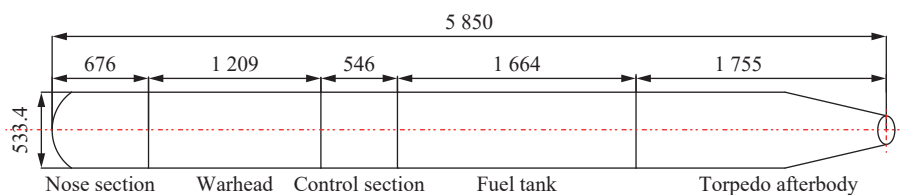


图 1 MK48 鱼雷尺寸结构示意图(单位: mm)

Fig. 1 Schematic diagram of MK48 torpedo structure (unit: mm)

根据国内外鱼雷武器一般用材,假设鱼雷壳体采用的材料是 7039 铝合金,战斗部壳体采用 TA1 钛合金,其余关键部件采用 A356 铝合金。假设中心坐标采用的坐标系原点建立在鱼雷头部中心点上, x 轴沿鱼雷轴向(从头到尾为正向), y 轴沿鱼雷横向(向上为正), z 轴垂直于 xOy 平面, $Oxyz$ 为右手笛卡尔坐标系。根据鱼雷结构特征,将关键部件尺寸和中心坐标作如下假设,具体特征见表 1~表 4。

超空泡射弹毁伤鱼雷的主要机理是,基于动能侵彻原理,破坏鱼雷内部装置,使鱼雷不能完成其战斗使命。主要毁伤模式:

- (1) 鱼雷壳体毁伤,将形成孔洞,海水由孔洞侵入鱼雷内部使敏感部件失效;

表 1 制导系统关键部件及其基本特征

Table 1 Key components and basic features of guidance system

部件	尺寸/mm	中心坐标/mm
换能器	39×156×156	(39,0,0)
发射机	65×234×234	(169,0,0)
声自导控制逻辑组件	195×39×208	(455,91,0)
接收机	195×39×208	(455,-91,0)
线团	156×234×234	(2600,0,0)

表 2 战斗部系统关键部件及其基本特征

Table 2 Key components and basic features of the warhead system

部件	尺寸/mm	中心坐标/mm
战斗部壳体	585×208×208	(1287,0,0)
引爆装置	65×117×65	(1469,0,0)

表 3 控制系统关键部件及其基本特征

Table 3 Key components and basic characteristics of control system

部件	尺寸/mm	中心坐标/mm
陀螺等传感器控制组件	260×26×182	(2158,0,0)
指令控制组件	260×52×182	(2158,-104,0)
电源组件	260×39×182	(2158,117,0)

表 4 动力推进系统关键部件及其基本特征

Table 4 Key components and basic characteristics of propulsion system

部件	尺寸/mm	中心坐标/mm
燃料舱	650×247×247	(3432,0,0)
辅助泵	195×234×234	(4303,0,0)
发动机	390×195×195	(4914,0,0)
泵喷射推进器	260×260×260	(5590,0,0)

(2)制导系统毁伤,将无法发出或接收信号,导致鱼雷无法搜索跟踪目标,造成鱼雷丢失目标或无法操纵鱼雷,使鱼雷失去控制,制导系统的主要关键部件及其基本特征如表 1 所示;

(3)战斗部系统毁伤,将可能造成 2 种结果:一是引爆战斗部使鱼雷解体,二是使鱼雷出现哑弹现象。战斗部系统的主要关键部件及其基本特征如表 2 所示;

(4)控制系统毁伤,将导致鱼雷无法按照指令进行规定控制动作;控制系统的主要关键部件及其基本特征如表 3 所示;

(5)动力推进系统毁伤,将会造成鱼雷缺乏动力,无法完成战斗任务;动力推进系统的主要关键部件及其基本特征如表 4 所示。

为便于表征部件的相对位置和尺寸大小,以及计算部件的暴露面积和命中概率,根据部件的形状特点,可以用六面体模拟部件单元的呈现面^[14]。根据表 1~表 4 各关键部件的基本特征^[15],将各关键部件简化为简单六面体,建立如图 2 所

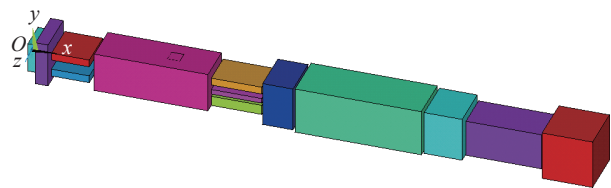


图 2 鱼雷关键部件结构模型

Fig. 2 Structural model of key parts of torpedo

示的 MK48-5 鱼雷关键部件结构模型,包括鱼雷制导系统、战斗部系统、控制系统、动力推进系统等。各关键部件在全雷中的分布如图 3 所示。

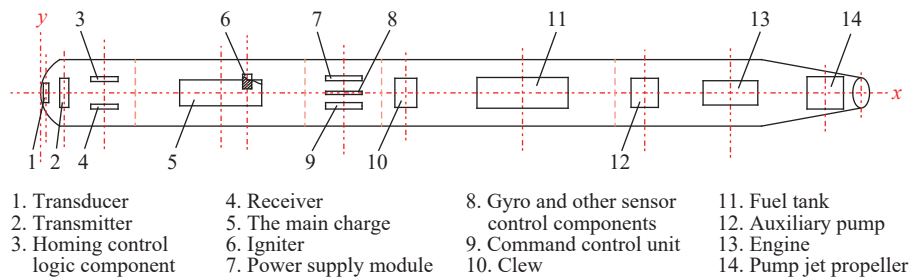


图 3 鱼雷结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of torpedo

2 等效模型

假设超空泡射弹水下侵彻鱼雷的过程分为射弹侵彻水介质和鱼雷壳体,以及射弹侵彻鱼雷内部关键部件两个阶段。

对于等效关系的研究,一般有 2 种理论:一种是极限穿透速度等效原则^[16],主要用于评估弹药威力;另一种是剩余穿深等效理论^[17],主要用于评估目标的抗毁伤能力,如陈贝贝等^[18]通过对穿甲燃烧弹侵彻 YAG 透明陶瓷及玻璃的剩余穿深实验研究,得出了 YAG 透明陶瓷防护能力显著高于玻璃材料,其抗毁伤能力更强。本文主要目的是建立射弹水下侵彻鱼雷所对应的多层靶,而非评估鱼雷的抗毁伤能力,故研究射弹侵彻水介质和鱼雷壳体时,采用极限穿透速度等效原则。

当射弹穿透鱼雷壳体后侵彻鱼雷内部关键部件时,弹体和鱼雷内部流场发生了一定的变化,对后续的侵彻具有一定的影响,继续采用极限穿透速度等效原则将有一定误差,故采用能量等效原则^[10,19],即超空泡射弹穿透鱼雷壳体后,剩余速度穿透鱼雷内部关键部件的耗能和剩余速度穿透相应等效靶的耗能相等。

水下超空泡射弹命中鱼雷的不同位置,会造成不同的毁伤,从而引起鱼雷不同功能的失效,故射弹对鱼雷不同命中角度和不同命中方向得到的等效靶模型也不同。

假设射弹在鱼雷不同部位均是垂直撞击,不考虑射弹对鱼雷不同命中角度的研究,可按照对鱼雷不同命中方向将其分为纵向侵彻和横向侵彻 2 类进行分析研究。超空泡射弹水下横向侵彻鱼雷的不同舱段,毁伤的关键部件不同,得到的等效靶模型也不同,根据图 1 所示的鱼雷尺寸结构示意图,将横向侵彻鱼雷分为以下 5 种情况进行分析研究,分别为:侵彻雷顶段、侵彻战雷段、侵彻控制段、侵彻燃料舱和侵彻后舱雷尾。本文选择纵向侵彻全雷和横向侵彻鱼雷战雷段、控制段、燃料舱和后舱雷尾进行分析研究。

超空泡射弹水下纵向侵彻全雷时,假设射弹依次贯穿水介质、鱼雷头部壳体、换能器、发射机、自导控制逻辑组件、战斗部壳体、主装药、控制系统、线团、燃料舱、辅助泵、发动机、泵喷射推进器和鱼雷尾部壳体,其中将水介质和鱼雷头部壳体等效为一层等效靶;为简化计算,将战斗部壳体和主装药等效为同一层等效靶;其余关键部件各等效为一层等效靶。故水下超空泡射弹纵向侵彻鱼雷时,可等效为 12 层等效靶,等效结构示意图如图 4 所示。

超空泡射弹水下横向侵彻鱼雷战雷段时,假设射弹依次贯穿水介质、鱼雷顶部壳体、战斗部壳体、主装药、引爆装置和鱼雷底部壳体,其中将水介质和鱼雷顶部壳体等效为一层等效靶;为简化计算,将战斗部壳体和主装药等效为一层等效靶;其余关键部件各等效为一层等效靶。因此水下超空泡射弹横向侵彻鱼雷战雷段时,可等效为 4 层等效靶,其等效结构示意图如图 5 所示。

当射弹横向侵彻鱼雷控制段时,假设射弹依次贯穿水介质、鱼雷顶部壳体、电源组件、陀螺等传感器控制组件、指令控制组件和鱼雷底部壳体,其中将水介质和鱼雷顶部壳体等效为一层等效靶,其余

4 个部件各等效为一层等效靶, 故将射弹横向侵彻鱼雷控制段时等效为 5 层等效靶, 其等效结构示意图如图 6 所示。

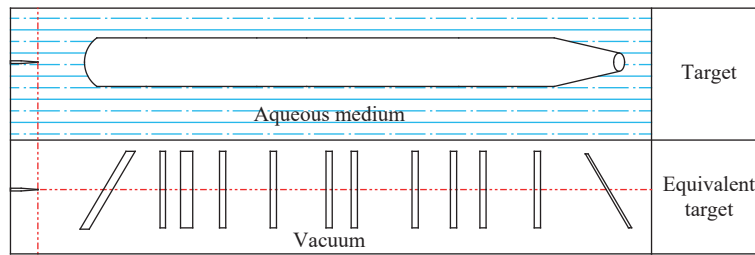


图 4 纵向侵彻等效靶结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of equivalent target structure for longitudinal penetration

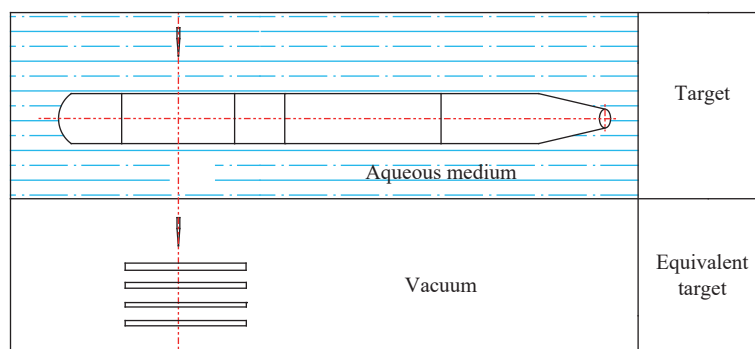


图 5 横向侵彻战雷段等效靶结构

Fig. 5 Schematic diagram of equivalent target structure for transversely penetrating warhead

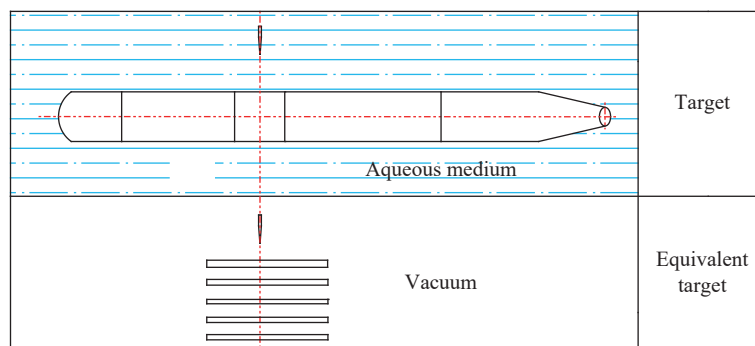


图 6 横向侵彻控制段等效靶结构

Fig. 6 Schematic diagram of equivalent target structure for transversely penetrating control section

超空泡射弹水下横向侵彻鱼雷燃料舱时, 由于燃料舱内各关键部件分布位置不同, 结合图 2 鱼雷关键部件结构模型和图 3 鱼雷结构示意图, 假设射弹横向侵彻鱼雷燃料舱段有以下 2 种情况: 一种是射弹依次贯穿水介质、鱼雷顶部壳体、线团和鱼雷底部壳体; 另一种是射弹依次贯穿水介质、鱼雷顶部壳体、燃料舱和鱼雷底部壳体。故超空泡射弹水下横向侵彻鱼雷燃料舱的等效模拟模型有以下 2 种: 一种是水介质和鱼雷顶部壳体等效为一层靶板, 线团等效为一层靶板, 鱼雷底部壳体等效为一层靶板, 共 3 层等效靶板, 其等效结构示意图如图 7 所示; 另一种是水介质和鱼雷顶部壳体等效为一层靶板, 燃料舱等效为一层靶板, 鱼雷底部壳体等效为一层靶板, 共 3 层等效靶板, 其等效结构示意图如图 8 所示。

超空泡射弹水下横向侵彻鱼雷后舱雷尾时, 由于后舱雷尾壳体结构不同, 以及其内各关键部件分布位置不同, 结合鱼雷关键部件结构模型(图 2)和鱼雷结构示意图(图 3), 假设射弹横向侵彻鱼雷后舱雷尾

有以下 3 种情况:(1)射弹依次贯穿水介质、鱼雷顶部壳体、辅助泵和鱼雷底部壳体;(2)射弹依次贯穿水介质、鱼雷顶部壳体、发动机和鱼雷底部壳体;(3)是射弹依次贯穿水介质、鱼雷尾部壳体、泵喷射推进器和鱼雷尾部壳体。故超空泡射弹水下横向侵彻鱼雷后舱雷尾的等效模拟模型有以下 3 种:(1)将水介质和鱼雷顶部壳体等效为一层靶板,辅助泵和鱼雷底部壳体分别等效为一层靶板,共 3 层等效靶,其等效结构示意图如图 9 所示;(2)将水介质和鱼雷顶部壳体等效为一层靶板,发动机和鱼雷底部壳体分别等效为一层靶板,共 3 层等效靶,其等效结构示意图如图 10 所示;(3)将水介质和鱼雷尾部壳体等效为一层靶板,泵喷射推进器等效为一层靶板,鱼雷尾部壳体等效为一层靶板,共 3 层等效靶板,其等效结构示意图如图 11 所示。

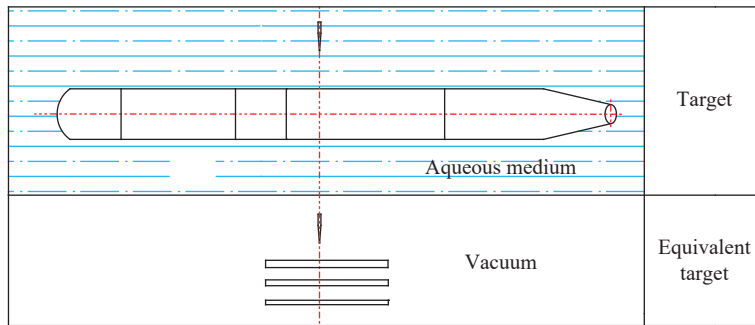


图 7 横向侵彻燃料舱等效靶结构 1

Fig. 7 Schematic 1 of equivalent target structure for transversely penetrating fuel tank

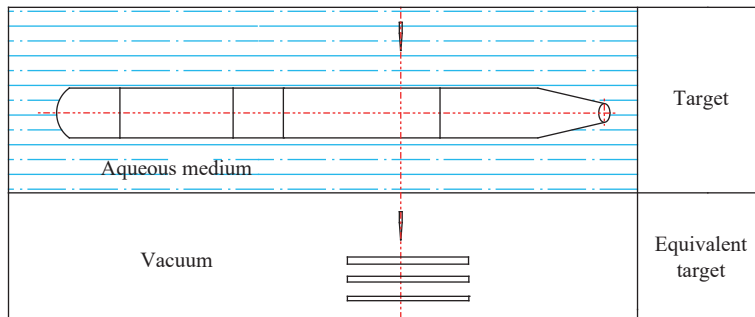


图 8 横向侵彻燃料舱等效靶结构 2

Fig. 8 Schematic 2 of equivalent target structure for transversely penetrating fuel tank

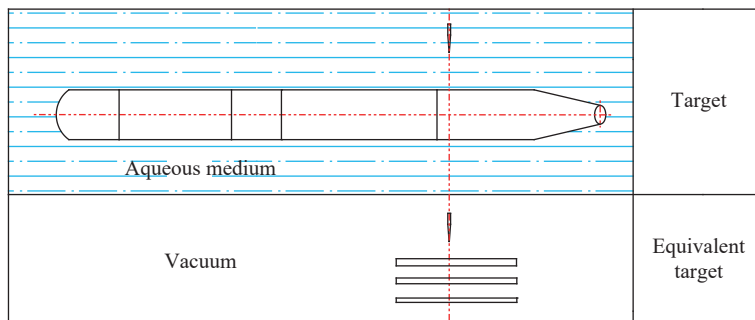


图 9 横向侵彻后舱雷尾等效靶结构 1

Fig. 9 Schematic 1 equivalent target structure for transversely penetrating torpedo afterbody

超空泡射弹水下侵彻鱼雷时,射弹损失的动能主要包括射弹侵彻水介质的耗能、鱼雷获得的动能、热效应及波动效应消耗的能量、射弹变形消耗的能量等。射弹在碰撞时会有一定的变形。射弹穿透鱼雷壳体后会产生二次破片,且射弹质量会有一定的损失。为简化问题研究,本文做以下假设:

- (1) 弹体是刚体, 且垂直撞击靶板;
- (2) 弹体的穿孔变形机制为塑性变形;
- (3) 忽略热效应和波动效应等次要功;
- (4) 忽略射弹穿透鱼雷壳体后质量的损失;
- (5) 忽略射弹穿透鱼雷壳体后二次破片的影响。

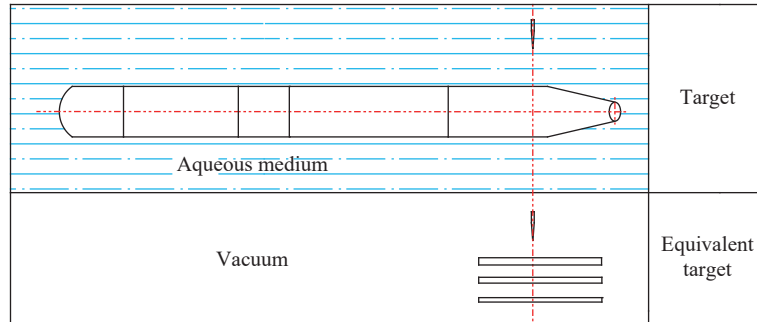


图 10 横向侵彻后舱雷尾等效靶结构 2

Fig. 10 Schematic 2 equivalent target structure for transversely penetrating torpedo afterbody

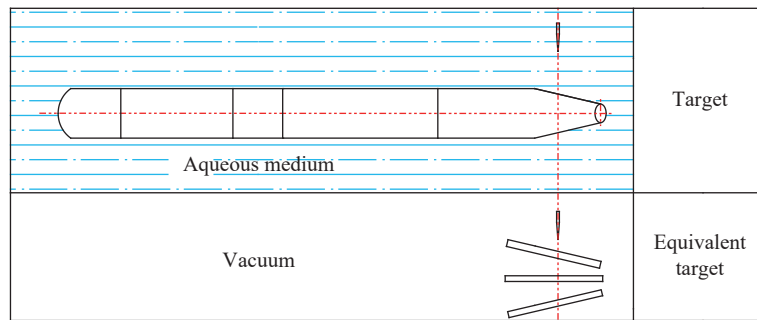


图 11 横向侵彻后舱雷尾等效靶结构示意图 3

Fig. 11 Schematic 3 equivalent target structure for transversely penetrating torpedo afterbody

3 耗能模型

射弹在侵彻水介质或鱼雷时, 所需的最小速度 v_{\min} 对应的动能即为侵彻水介质或鱼雷所消耗的能量 W :

$$\frac{1}{2}mv_{\min}^2 = W \tag{1}$$

3.1 水介质耗能模型

由于将水介质和鱼雷壳体等效为一层等效靶, 依据极限穿透速度等效原则, 并结合式 (1) 可知此时 $W = W_w + W_s$ (W 、 W_w 和 W_s 分别为侵彻等效靶、水介质、鱼雷壳体所需的耗能)。

基于刚体力学给出的射弹侵彻水介质所受阻力为:

$$F = \frac{1}{2}C_D\rho S v^2 = -m \frac{dv}{dt} \tag{2}$$

式中: C_D 是阻力系数; ρ 是水介质密度; S 是射弹最大横截面积; v 是射弹速度。令 $\partial_0 = C_D\rho S/(2m)$, 对式 (2) 积分可得射弹速度 v 与在水介质中位移 x 的关系为:

$$v = v_0 e^{-\partial_0 x} \tag{3}$$

式中: v_0 为射弹初速。射弹侵彻一定厚度水介质消耗的能量是:

$$W_w = \frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mv_0^2(1 - e^{-2\theta_0 x}) \quad (4)$$

3.2 靶板耗能模型

Chen 等^[20]提出了一种基于动态空腔膨胀模型的通用无量纲公式,用于预测在无变形弹丸正常撞击下对金属的侵彻深度。Forrestal 等^[21]建立了刚性弹丸侵彻韧性金属靶的穿透方程。Chen 等^[22]通过研究不同几何特性的刚性弹丸对厚板的侵彻问题,得出了预测厚金属板穿孔的弹道极限速度和剩余速度的公式。Warren 等^[23]通过研究球形空穴膨胀理论斜侵彻问题时,构造了一个球形空穴膨胀理论的自由表面效应修正函数。孙炜海等^[24]将薄金属靶板的变形分为局部变形和整体变形,通过准静态柱形空穴膨胀理论、载荷-位移关系和虚功原理,得出了锥头弹丸穿透金属靶板的弹道极限公式和耗能公式。本文在文献^[24]的基础上构造出目标靶和等效靶之间的厚度关系。

Hill^[25]通过研究柱形空穴在无限体中的膨胀问题,得出了刚性-理想塑性不可压缩材料的表面应力为

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{3}}\sigma_y \left[1 + \ln \left(\frac{E}{\sqrt{3}\sigma_y} \right) \right] \quad (5)$$

式中: E 为弹性模量; σ_y 为金属材料的准静态屈服强度。

射弹侵彻薄靶时,靶板材料对射弹的表面法向阻力为:

$$\sigma_n = f\sigma = \alpha\sigma_y \quad (6)$$

$$f = \frac{2 \ln \left[1 + N \frac{H}{d \sin(\theta/2)} \right]}{1 + \ln E / (\sqrt{3}\sigma_q)} \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{\sigma f}{\sigma_q} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left[1 + N \frac{H}{d \sin(\theta/2)} \right] \quad (8)$$

式中: f 为准静态柱形空穴膨胀理论的自由表面效应修正函数^[24]; N 为待定系数,文中取值为 7; H 为靶板厚度; d 是射弹直径; θ 是射弹倾角。

如图 12 所示,射弹侵彻薄靶时,即 $L_n > H$, 贯穿薄靶的过程可分为 3 个阶段,分别为:压入阶段, $s \leq H$; 侵彻阶段, $H < s \leq L_n$; 穿出阶段, $L_n < s \leq L_n + H$ 。基于 3 个阶段分别对式 (6) 积分,得出射弹侵彻薄靶时 3 个阶段所受轴向阻力分别为:

$$\begin{cases} F_1 = \pi s^2 \tan^2(\theta/2) \sigma_n \left[1 + \frac{\mu}{\tan(\theta/2)} \right] & s \leq H \\ F_2 = \pi (2s - H) H \tan^2(\theta/2) \sigma_n \left[1 + \frac{\mu}{\tan(\theta/2)} \right] & H < s \leq L_n \\ F_3 = \pi [L_n^2 - (s - H)^2] \tan^2(\theta/2) \sigma_n \left[1 + \frac{\mu}{\tan(\theta/2)} \right] & L_n < s \leq L_n + H \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\mu = 0.03$, 为弹、靶之间的动摩擦因数^[11]。

对式 (9) 积分,得到射弹侵彻薄靶时的局部耗能

$$W_{loc} = \int_0^H F_1 ds + \int_H^{L_n} F_2 ds + \int_{L_n}^{L_n+H} F_3 ds = \frac{1}{4} \pi \alpha H d^2 \left[1 + \frac{\mu}{\tan(\theta/2)} \right] \sigma_y \quad (10)$$

当板厚与弹径之比 H/d 较小时,靶板的整体变形较大,需要考虑整体耗能 W_{tot} ^[11]:

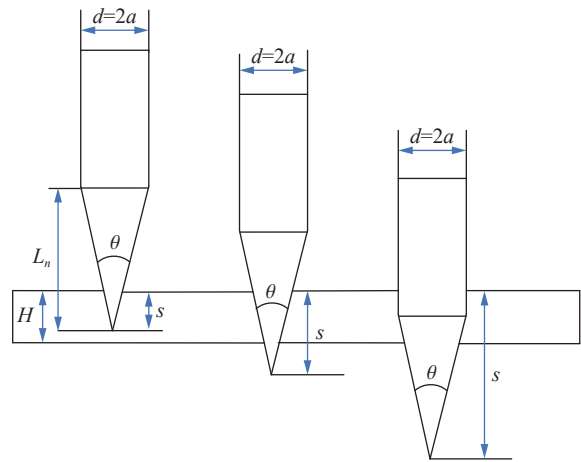


图 12 射弹侵彻薄靶示意图

Fig. 12 Schematic diagram of projectile for penetrating thin

$$W_{\text{tot}} = 6.984(H/d)^{2.256} \sigma_y d^3 \quad (11)$$

3.3 目标靶与等效靶之间的厚度关系

超空泡射弹以弹道极限速度 v_{50} 穿透水介质和鱼雷壳体时, 对应动能即为最小穿透能量。射弹穿透水介质和鱼雷壳体所消耗的能量与射弹对应等效靶所消耗的能量相等:

$$\frac{1}{2} m v_{50}^2 = \frac{1}{2} m v_0^2 (1 - e^{-2\theta_0 x}) + \frac{1}{4} \pi \alpha_1 H_1 d^2 \left[1 + \frac{\mu}{\tan(\theta/2)} \right] \sigma_{y1} + 6.984(H_1/d)^{2.256} \sigma_{y1} d^3 \quad (12)$$

$$\frac{1}{2} m v_{50}^2 = \frac{1}{4} \pi \alpha_2 H_2 d^2 [1 + \mu/\tan(\theta/2)] \sigma_{y2} \quad (13)$$

式中: H_1 和 H_2 分别为顶部鱼雷壳体和顶部等效靶的厚度, α_1 和 α_2 分别为顶部鱼雷壳体和顶部等效靶对应的系数 α , σ_{y1} 和 σ_{y2} 分别为顶部鱼雷壳体和顶部等效靶的屈服强度。

由式 (13) 可得出弹道极限速度:

$$v_{50} = \sqrt{\frac{\pi \alpha_2 H_2 d^2 \left[1 + \frac{\mu}{\tan(\theta/2)} \right] \sigma_{y2}}{2m}} \quad (14)$$

基于极限穿透速度等效原则, 将式 (14) 带入式 (12), 从而建立水介质和鱼雷壳体与相关材料之间的厚度关系^[11]:

$$\alpha_2 H_2 = \alpha_1 H_1 e^{2\theta_0 x} + \frac{6.984(H_1/d)^{2.256} d}{\frac{1}{4} \pi \left[1 + \frac{\mu}{\tan(\theta/2)} \right] e^{-2\theta_0 x}} \quad (15)$$

射弹穿透鱼雷壳体后的剩余速度 v_r 为:

$$v_r = \sqrt{v_0^2 - v_{50}^2} \quad (16)$$

射弹穿透水介质和鱼雷壳体后, 以剩余速度 v_r 继续侵彻鱼雷内部关键部件和底部壳体, 基于能量等效原则, 射弹穿透内部关键部件或底部壳体所消耗的能量与射弹穿透对应等效靶所消耗的能量相等:

$$\frac{1}{2} m v_r^2 = \frac{1}{4} \pi \alpha_3 H_3 d^2 \left[1 + \frac{\mu}{\tan(\theta/2)} \right] \sigma_{y3} + 6.984(H_3/d)^{2.256} \sigma_{y3} d^3 = \frac{1}{4} \pi \alpha_2 H_4 d^2 \left[1 + \frac{\mu}{\tan(\theta/2)} \right] \sigma_{y2} \quad (17)$$

式中: H_3 和 H_4 为底部鱼雷壳体与底部等效靶的厚度, α_3 为底部鱼雷壳体材料对应的系数 α , σ_{y3} 为底部鱼雷壳体的屈服强度。

根据式 (17) 建立鱼雷内部关键部件或底部壳体与相关材料之间的厚度关系:

$$\alpha_2 H_4 = \alpha_3 H_3 \frac{\sigma_{y3}}{\sigma_{y2}} + \frac{6.984(H_3/d)^{2.256} \sigma_{y3} d}{\frac{\pi}{4} \left[1 + \frac{\mu}{\tan(\theta/2)} \right] \sigma_{y2}} \quad (18)$$

3.4 计算实例

采用上述推导公式对等效靶厚度进行理论计算, 计算射弹横向侵彻鱼雷战雷段的等效靶厚度。假设超空泡射弹弹体直径 $d = 12.7 \text{ mm}$, 射弹倾角 $r = 30^\circ$, 射弹质量 $m = 11.65 \text{ g}$, 射弹初速 $v_0 = 900 \text{ m/s}$; 等效靶材料均为 LY-12 铝合金^[26]靶板, LY-12 铝合金是一种高强度硬铝, 在兵工领域应用较广, 可用于各种材料的等效, 且 LY-12 铝合金制备工艺成熟, 生产成本较低。鱼雷及等效靶材料参数见表 5。

假设水介质及鱼雷壳体厚度为 16 mm, 鱼雷壳体及关键部件的厚度按实际模型进行一定估算假设, 结合式 (15) 及式 (18) 计算射弹横向侵彻鱼雷战雷段的等效靶厚度, 计算结果见表 6。其他等效靶模型靶板厚度的计算方法同上。

表 5 鱼雷及等效靶材料参数

Table 5 Material parameters of torpedo and equivalent target

材料	密度/(g·cm ⁻³)	屈服强度/MPa	弹性模量/GPa
7039铝合金	2.78	503.00	71.54
A356铝合金	2.80	216.64	72.40
TA1钛合金	4.51	275.00	110.00
LY-12铝合金	2.78	325.00	68.00

表 6 射弹横向侵彻鱼雷战雷段等效靶的理论计算数据

Table 6 The theoretical calculation data of the equivalent target of warhead for the transverse penetration of projectiles

名称	厚度/mm	等效靶厚度/mm
水介质和壳体	16.0	8
引爆装置	2	4
主装药和战斗部壳体	5.5	30
底部壳体	3	6

4 等效模拟靶

建立多层靶的关键之一是确定相邻靶板之间的间隙。假设各关键部件材质、厚度均匀,各关键部件之间的相对间隙是其质心之间的距离,相邻等效靶之间的相对间隙是对应关键部件之间的相对间隙,靶板之间的间隙是相对间隙减去靶板厚度的一半。

4.1 射弹纵向侵彻全雷的等效靶

根据鱼雷实际模型,假设后舱雷尾的倾角为 150°,由于雷顶段头部壳体是弧形,考虑打击概率,将水介质和头部壳体等效为一层倾角是 60°的靶板,后舱雷尾的尾部壳体等效为一层 150°的靶板。结合各关键部件基本特征表,根据图 4 射弹纵向侵彻全雷的等效结构示意图,并依据式 (15) 和式 (18),做出水下超空泡射弹纵向侵彻全雷等效模型结构表,见表 7。综上,得出超空泡射弹水下纵向侵彻全雷等效模拟靶,见图 13。

表 7 射弹纵向侵彻全雷等效模型结构表

Table 7 Structure table of equivalent model for longitudinal penetration of projectiles into mine

部位	等效厚度/mm	相对间隙/mm	倾角/(°)
水介质和壳体	8	0	60
换能器	2	34	90
发射机	4	127	90
自导控制逻辑组件	2	283	90
战斗部	30	829	90
控制系统	6	867	90
线团	2	438	90
燃料舱	4	829	90
辅助泵	8	866	90
发动机	12	601	90
泵喷射推进器	10	665	90
尾部壳体	6	252	150

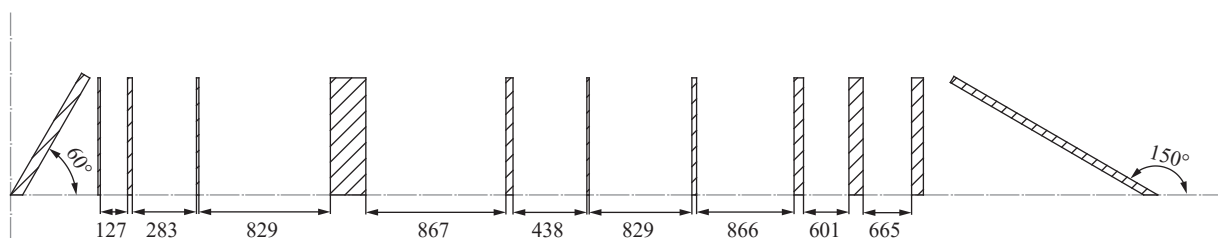


图 13 射弹纵向侵彻全雷的等效模拟靶(mm)

Fig. 13 Equivalent simulated target for longitudinal penetration of projectile into mine (mm)

4.2 射弹横向侵彻鱼雷战雷段的等效靶

结合表 2 战斗部系统关键部件基本特征, 和图 5 射弹横向侵彻鱼雷战雷段等效结构示意图, 并依据式 (15) 和式 (18), 得出射弹横向侵彻鱼雷战雷段等效模型结构表, 见表 8。

图 14 是射弹横向侵彻鱼雷战雷段的等效模拟靶, 从左至右依次为水介质和鱼雷顶部壳体、引爆装置、主装药和战斗部壳体、鱼雷底部壳体的等效靶。

表 8 射弹横向侵彻鱼雷战雷段等效模型

Table 8 Equivalent model for transverse penetration of projectiles into warhead

部位	等效厚度/mm	相对间隙/mm	倾角/(°)
水介质和壳体	8	0	90
引爆装置	4	169.7	90
主装药和战斗部壳体	30	81.5	90
底部壳体	6	256.2	90

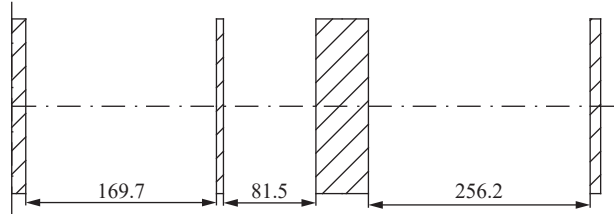


图 14 射弹横向侵彻鱼雷战雷段等效模拟靶(单位: mm)

Fig. 14 Equivalent simulated target for transverse penetration of projectiles into warhead (unit: mm)

4.3 射弹横向侵彻鱼雷控制段的等效靶

结合图 6 射弹横向侵彻鱼雷的等效结构示意图, 并依据式 (15) 和式 (18), 做出表 9 射弹横向侵彻鱼雷控制段的等效模拟模型表。

综上, 得出超空泡射弹水下横向侵彻鱼雷控制段的等效模拟靶, 从左至右依次为水介质和壳体、电源组件、陀螺等传感器控制组件、底部壳体, 见图 15。

表 9 射弹横向侵彻鱼雷控制段等效模型结构表

Table 9 Structure table of equivalent model for transverse penetration of projectiles into control section

名称	等效厚度/mm	相对间隙/mm	倾角/(°)
水介质和壳体	8	0	90
电源组件	6	142.7	90
陀螺等传感器控制组件	6	111.0	90
指令控制组件	6	98.0	90
底部壳体	6	156.7	90

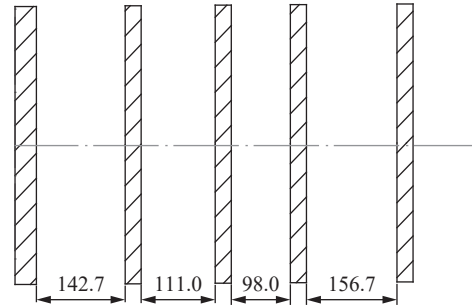


图 15 射弹横向侵彻鱼雷控制段的等效模拟靶(单位: mm)

Fig. 15 Equivalent simulated target for transverse penetration of projectiles into control section (unit: mm)

4.4 射弹横向侵彻鱼雷燃料舱的等效靶

结合各关键部件基本特征, 及图 7 和图 8 射弹横向侵彻鱼雷燃料舱等效靶结构示意图, 并依据式 (15) 和式 (18), 做出射弹横向侵彻鱼雷燃料舱的等效模型结构表, 见表 10 和表 11。

表 10 射弹横向侵彻鱼雷燃料舱等效模型结构表 1

Table 10 Structure table 1 of equivalent model for transverse penetration of projectiles into fuel tank

部位	等效厚度/mm	等效间隙/mm	倾角/(°)
水介质和顶部壳体	8	0	90
线圈	2	261.7	90
底部壳体	6	262.7	90

表 11 射弹横向侵彻鱼雷燃料舱等效模型结构表 2

Table 11 Structure table 2 of equivalent model for transverse penetration of projectiles into fuel tank

部位	等效厚度/mm	等效间隙/mm	倾角/(°)
水介质和顶部壳体	8	0	90
燃料舱	4	260.7	90
底部壳体	6	261.7	90

综上,超空泡射弹水下横向侵彻鱼雷燃料舱的等效模拟靶有两种,分别见图 16 和图 17。

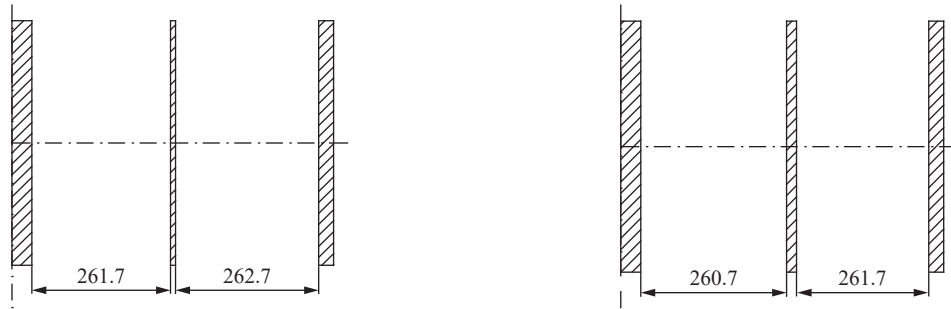


图 16 射弹横向侵彻鱼雷燃料舱的等效模拟靶 1 (单位: mm) 图 17 射弹横向侵彻鱼雷燃料舱的等效模拟靶 2 (单位: mm)

Fig. 16 Equivalent simulated target 1 for transverse penetration of projectiles into fuel tank (unit: mm)

Fig. 17 Equivalent simulated target 2 for transverse penetration of projectiles into fuel tank (unit: mm)

4.5 射弹横向侵彻鱼雷后舱雷尾等效靶

鱼雷部分尾部壳体具有一定的锥度,假设锥度分别为 30° 和 150° ,则该部分顶部壳体和底部壳体等效靶的倾角分别为 30° 和 150° 。结合各关键部件基本特征,及图 9~图 11 射弹横向侵彻鱼雷后舱雷尾等效靶结构示意图,并依据式 (15) 和式 (18),做出射弹横向侵彻鱼雷后舱雷尾的等效模型结构表,见表 12~表 14。

表 12 射弹横向侵彻后舱雷尾等效模型结构 1

Table 12 Equivalent model 1 for transverse penetration of projectiles into torpedo afterbody

部位	等效厚度/mm	等效间隙/mm	倾角/(°)
水介质和壳体	8	0	90
辅助泵	8	258.7	90
壳体	6	259.7	90

表 13 射弹横向侵彻后舱雷尾等效模型结构 2

Table 13 Equivalent model 2 for transverse penetration of projectiles into torpedo afterbody

部位	等效厚度/mm	等效间隙/mm	倾角/(°)
水介质和壳体	8	0	90
发动机	12	256.7	90
壳体	6	257.7	90

表 14 射弹横向侵彻后舱雷尾等效模型结构 3

Table 14 Equivalent model 3 for transverse penetration of projectiles into torpedo afterbody

部位	等效厚度/mm	等效间隙/mm	倾角/(°)
水介质和壳体	8	0	30
泵喷射推进器	10	257.7	90
壳体	6	258.7	150

综上,超空泡射弹水下侵彻鱼雷后舱雷尾的等效模拟靶有以下 3 种,见图 18~图 20。

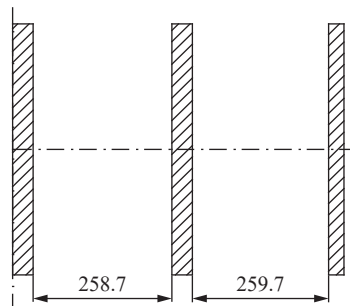


图 18 射弹横向侵彻鱼雷后舱雷尾等效模拟靶 1(mm)

Fig. 18 Equivalent simulated target 1 for transverse penetration of projectiles into torpedo afterbody (mm)

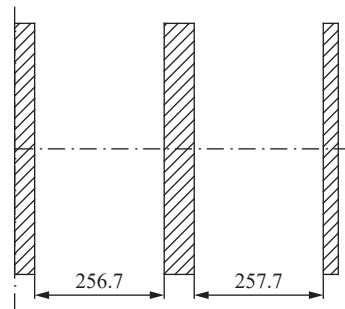


图 19 射弹横向侵彻鱼雷后舱雷尾等效模拟靶 2(mm)

Fig. 19 Equivalent simulated target 2 for transverse penetration of projectiles into torpedo afterbody (mm)

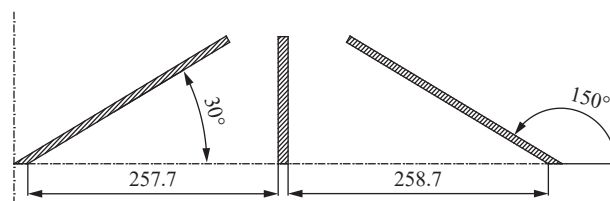


图 20 射弹横向侵彻鱼雷后舱雷尾等效模拟靶 3(单位: mm)

Fig. 20 Equivalent simulated target 3 for transverse penetration of projectiles into torpedo afterbody (unit: mm)

5 结 论

本文将超空泡射弹水下侵彻 MK48-5 鱼雷等效为多层靶模型,通过考虑水介质和射弹垂直侵彻鱼雷典型方向以及典型舱段的影响,可得到以下结论。

(1)超空泡射弹纵向侵彻鱼雷陆上试验,可采用 12 层 LY-12 铝合金等效靶,其中头部壳体等效为 60° 的 LY-12 铝合金靶板,尾部壳体等效为 150° 的 LY-12 铝合金靶板,其余等效靶均为 90° 的 LY-12 铝合金靶板,每层靶板的厚度从左至右分别为: 8、2、4、2、30、6、2、4、8、12、10、6 mm;

(2)超空泡射弹横向侵彻鱼雷战雷段陆上试验,可采用 4 层 LY-12 铝合金等效靶,各靶均为 90° 的靶板,每层靶板的厚度从左至右分别为: 8、4、30、6 mm;

(3)超空泡射弹横向侵彻鱼雷控制段陆上试验,5 层 LY-12 铝合金等效靶,各靶均为 90° 靶板,每层靶板的厚度从左至右分别为: 8、6、6、6、6 mm;

(4)超空泡射弹横向侵彻鱼雷燃料舱陆上试验,可采用 2 种等效靶模型,均为 3 层 90° LY-12 铝合金靶板:第一种是水介质和鱼雷顶部壳体、线团、鱼雷底部壳体,每层靶板的厚度从左至右分别为: 8、2、6 mm;第二种是水介质和鱼雷顶部壳体、燃料舱、鱼雷底部壳体,每层靶板的厚度从左至右分别为: 8、4、6 mm;

(5)超空泡射弹横向侵彻鱼雷后舱雷尾陆上试验,可采用 3 种等效靶模型,均为 3 层 LY-12 铝合金靶板:第 1 种是水介质和鱼雷壳体、辅助泵、鱼雷底部壳体,靶板倾角均为 90° ,每层靶板的厚度从左至右分别为: 8、8、6 mm;第 2 种是水介质和鱼雷壳体、发动机、鱼雷底部壳体,靶板倾角均为 90° ,每层靶板的厚度从左至右分别为: 8、12、6 mm;第 3 种是水介质和鱼雷尾部壳体、泵喷射推进器、鱼雷尾部壳体,其中水介质和鱼雷尾部壳体等效为倾角是 30° 的 8 mm 靶板,泵喷射推进器等等效为倾角为 90° 的 10 mm 靶板,鱼雷尾部壳体等效为倾角是 150° 的 6 mm 靶板。

参考文献:

- [1] 金大桥,王聪,余锋. 水下超空泡射弹研究综述[J]. 飞航导弹, 2010(7): 19-23. DOI: 10.16338/j.issn.1009-1319.2010.07.004.

- JIN D Q, WANG C, YU F. A Review of underwater supercavitation projectiles [J]. *Winged Missiles Journal*, 2010(7): 19–23. DOI: 10.16338/j.issn.1009-1319.2010.07.004.
- [2] FARRAND T, MAGNESS L, BURKINS M. Definition and uses of RHA equivalences for medium caliber targets [C]// Proceedings of the 19th International Symposium of Ballistics. Interlaken, 2001: 1159–1165.
- [3] HELD M. Shaped charge steel equivalence [C]// Proceedings of the 20th International Symposium on Ballistics. Orlando, 2002: 23–27.
- [4] 熊冉, 高欣宝, 张俊坤, 等. 杆式穿甲弹侵彻下陶瓷与均质钢板的等效关系数值分析 [J]. *弹箭与制导学报*, 2013, 33(5): 102–104. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdx.2013.05.004.
- XIONG R, GAO X B, ZHANG J K, et al. The simulation on equivalence between ceramic and homogeneous steel impacted by rod armor-piercing projectile [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2013, 33(5): 102–104. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdx.2013.05.004.
- [5] 周捷, 智小琦, 徐锦波, 等. 小尺寸破片对单兵防护装备的侵彻研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(2): 023304. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0023.
- ZHOU J, ZHI X Q, XU J B, et al. Research on penetration of small size fragment to single soldier protection equipment [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(2): 023304. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0023.
- [6] 曹兵. 603靶板抗 EFP 侵彻等效靶实验研究 [J]. *爆破器材*, 2007, 36(1): 36–39. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2007.01.012.
- CAO B. Experimental study on the equivalent target of 603 armor penetrated by EFP [J]. *Explosive Materials*, 2007, 36(1): 36–39. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2007.01.012.
- [7] 李运禄. EFP/破片组合式防空反导战斗部对反舰导弹毁伤的数值模拟研究 [D]. 太原: 中北大学, 2016: 58–81.
- LI Y L. Research on damage performance of EFP/fragment combined air defense and antimissile warhead to anti-ship missile [D]. Taiyuan: North University of China, 2016: 58–81.
- [8] 张培忠, 何永, 高树滋. 相似模拟法在脱壳穿甲弹威力靶设计中的应用 [J]. *南京理工大学学报*, 2000, 24(1): 6–8. DOI: 10.14177/j.cnki.32-1397n.2000.01.002.
- ZHANG P Z, HE Y, GAO S Z. Application of similitude method in the design of sabot armor piercing projectile power target [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2000, 24(1): 6–8. DOI: 10.14177/j.cnki.32-1397n.2000.01.002.
- [9] 赵金库. 小口径尾翼稳定脱壳穿甲弹技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2010: 58–72. DOI: 10.7666/d.y1697774.
- ZHAO J K. Research on the technology of small caliber tail stabilized shelled penetrator [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010: 58–72. DOI: 10.7666/d.y1697774.
- [10] 周岩, 唐平, 常敬臻, 等. 舰舷结构与均质靶板等效关系的基本方法 [J]. *弹道学报*, 2008, 20(1): 30–34.
- ZHOU Y, TANG P, CHANG J Z, et al. Basic method for equivalent relation between structure of warship and homogeneous target [J]. *Journal of Ballistics*, 2008, 20(1): 30–34.
- [11] 刘亭, 刘轶强. 射弹侵彻下鱼、水雷壳体与均质钢的等效关系 [J]. *水雷战与舰船防护*, 2014, 22(4): 8–12, 16.
- LIU T, LIU Y Q. Equivalent relation of torpedo and sea mine shell and homogeneous steel under projectile penetration [J]. *Mine Warfare & Ship Self-Defence*, 2014, 22(4): 8–12, 16.
- [12] 尹韶平, 刘瑞生. 鱼雷总体技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- YIN S P, LIU R S. Torpedo overall technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- [13] 石秀华, 王晓娟. 水中兵器概论-鱼雷分册 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005: 1–11.
- SHI X H, WANG X J. Introduction to underwater weapons torpedo section [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005: 1–11.
- [14] 李向东, 杜忠华. 目标易损性 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2013.
- LI X D, DU Z H. Target vulnerability [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2013.
- [15] 康德. 超空泡射弹对典型鱼雷的毁伤效能评估方法研究 [D]. 武汉: 海军工程大学, 2014: 10–26.
- KANG D. Study on the method of evaluating the damage efficiency of supercavitation projectile to typical torpedoes [D]. Wuhan: Naval Engineering University, 2014: 10–26.
- [16] 曹兵. 靶板等效方法研究 [J]. *弹箭与制导学报*, 2003, 23(3): 122–123.
- CAO B. Study on equivalent target experimental methods [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2003, 23(3): 122–123.
- [17] 杨玉林, 赵国志, 杜忠华, 等. 动能弹侵彻陶瓷与均质钢板的等效关系 [J]. *弹道学报*, 2003, 15(4): 32–35. DOI: 10.3969/j.

- issn.1004-499X.2003.04.007.
- YANG Y L, ZHAO G Z, DU Z H, et al. RHA equivalence of ceramic impacted by kinetic energy projectiles [J]. *Journal of Ballistics*, 2003, 15(4): 32–35. DOI: 10.3969/j.issn.1004-499X.2003.04.007.
- [18] 陈贝贝, 张先锋, 邓佳杰, 等. 弹体侵彻 YAG 透明陶瓷/玻璃的剩余深度 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(8): 083301. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0372.
- CHEN B B, ZHANG X F, DENG J J, et al. Residual penetration depth of a projectile into YAG transparent ceramic/glass [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(8): 083301. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0372.
- [19] 赵国志, 杨玉林. 动能弹对装甲目标毁伤评估的等效靶模型 [J]. *南京理工大学学报*, 2003, 27(5): 509–514. DOI: 10.14177/j.cnki.32-1397n.2003.05.009.
- ZHAO G Z, YANG Y L. Equivalent surrogates for armor target damage assessment by kinetic energy projectiles [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2003, 27(5): 509–514. DOI: 10.14177/j.cnki.32-1397n.2003.05.009.
- [20] CHEN X W, LI Q M. Deep penetration of a non-deformable projectile with different geometrical characteristics [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2002, 27(6): 619–637. DOI: 10.1016/S0734-743X(02)00005-2.
- [21] FORRESTAL M J, TZOU D Y, ASKARI E, et al. Penetration into ductile metal targets with rigid spherical-nose rods [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1995, 16(5–6): 699–710. DOI: 10.1016/0734-743X(95)00005-U.
- [22] CHEN X W, LI Q M. Perforation of a thick plate by rigid projectiles [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 28(7): 743–759. DOI: 10.1016/S0734-743X(02)00152-5.
- [23] WARREN T L, HANCHAK S J, POORMON K L. Penetration of limestone targets by ogive-nosed VAR 4340 steel projectiles at oblique angles: experiments and simulations [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2004, 30(10): 1307–1331. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2003.09.047.
- [24] 孙炜海, 文鹤鸣. 锥头弹丸低速撞击下薄金属靶板的穿透 [J]. *固体力学学报*, 2009, 30(4): 361–367. DOI: 10.19636/j.cnki.cjasm42-1250/o3.2009.04.006.
- SUN W H, WEN H M. Perforation of thin metal plates struck by conical-nosed projectiles at relatively low velocities [J]. *Chinese Journal of Solida Mechanics*, 2009, 30(4): 361–367. DOI: 10.19636/j.cnki.cjasm42-1250/o3.2009.04.006.
- [25] HILL R. The mathematical theory of plasticity [M]. Oxford: Oxford University Press, 1950: 125–127.
- [26] 米双山, 张锡恩, 陶贵明. 钨球侵彻 LY-12 铝合金靶板的有限元分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(5): 477–480. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)05-0477-04.
- MI S S, ZHANG X E, TAO G M. Finite element analysis of spherical fragments penetrating LY-12 aluminum alloy target [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(5): 477–480. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)05-0477-04.

(责任编辑 王小飞)