

文章编号: 1001-1455(2005)06-0547-06

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*

段卓平

(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:以舰船典型筋板结构为目标,设计了带加强筋的结构靶,并用模拟实验弹体,对单层带加强筋的结构靶进行了斜侵彻实验,通过天幕靶和高速运动分析系统的测量,得到了两种倾斜着靶条件下不同着靶位置的靶前、靶后弹道参数;通过对靶板破坏结果的分析,得到实验弹靶条件下加强筋结构靶的破坏模式。在现有弹丸侵彻均质靶板理论的基础上和一定假设条件下,得到弹丸对加筋结构靶侵彻的终点弹道理论计算模型,弹丸过靶后剩余速度的理论计算结果与实验结果基本一致。

关键词:爆炸力学;计算模型;侵彻实验;半穿甲弹丸;加筋结构靶

中图分类号: O385

国标学科代码: 130·3530

文献标志码: A

1 引 言

由横、纵 T 形加强筋和外板通过埋弧焊或其他方法,焊接在一起的板、筋结构是舰船固有的基本结构。为了对这类目标实施有效毁伤,有必要对加筋结构的目标特性,以及在侵彻环境下加强筋的作用机理,做深入细致的研究,使战斗部对目标的毁伤达到最佳效果。半穿甲反舰战斗部是内爆式的战斗部,它利用弹体自身的动能钻入舰体内部然后发生爆炸,因此可充分发挥战斗部的各种毁伤效能^[1],这时的侵彻贯穿问题属弹丸对薄板侵彻问题。尽管人们对弹丸侵彻薄板问题进行了大量的研究,得到了一系列理论或经验公式,但研究的主要内容大都局限于弹丸对均质靶板的侵彻。近年来,国内有通过数值模拟方法研究加筋结构靶的等效问题的报道^[2],对于弹丸侵彻加筋结构靶的实验和理论研究未见报道。

本文中,以舰船典型结构为目标,设计出试验模拟靶;参考超音速半穿甲弹丸壳体结构实验研究的结果^[3],设计了模拟弹体,并进行弹丸对加筋结构靶板的侵彻实验研究,同时,根据靶板的破坏模式以及弹丸对均质靶板侵彻的理论,在一定的假设条件下,建立了弹丸侵彻加筋结构靶的极限穿透速度和剩余速度计算公式,剩余速度的理论计算结果与实验结果吻合较好。

2 实验研究

2.1 实验设计和系统

美国“尼米兹”级航母用材为 HY-80 或 HY-100,国产 921A 型舰船专用钢材的力学性质与美航母用材 HY-80 相当,所以靶板的材质选用 921A 钢。921A 钢的力学性质如表 1。靶板的总体尺寸为:长 1 400 mm,宽 1 000 mm。面板厚 15.2 mm;大筋高度 68 mm,宽 15.2 mm;小筋高度 26 mm,宽 7 mm。小筋间距 125 mm,大筋间距 600 mm,如图 1 所示。

表 1 材料 921A 钢的力学性质

Table 1 Material mechanics character of 921A steel

σ_s /MPa	σ_b /MPa	断后伸长率 δ_5	断面收缩率 Ψ	冲击吸收功 A /(kJ/J)		
685	760	23	0.77	206	232	208

* 收稿日期: 2004-11-22; 修回日期: 2005-09-16

作者简介: 段卓平(1965—),男,博士,研究员,博士生导师。

这里弹丸选择截卵形,截顶直径 d 约为弹径 D 的 $1/5$ 。截顶后的弹体总长不变,因而柱段增长,使装药量增加,有利于战斗部威力提高。截卵形头为变壁厚头壳,自顶点轴线向“头—柱”过度区逐渐变薄,顶端最厚为壁厚的 5 倍,柱段壁厚取为 $10\sim 14$ mm。弹体材料为 30CrMnSiNi2A,弹体质量约 16 kg。弹体长 370 mm,弹径 105 mm,弹丸头部为截卵形,截头直径 20 mm,弹体弧部半径 180 mm。

实验系统如图 2 所示,105 坦克炮在距靶 100 m 处水平发射实验弹丸,使弹丸垂直打击靶板,靶前设置天幕靶测量弹丸着靶速度 v_0 ,在靶侧面 50 m 处设置高速运动分析系统,另一侧设置标志板,观测弹体着靶时和过靶后的弹道曲线及偏转角,同时测量弹丸着靶速度和过靶后的剩余速度。回收装置回收弹体,观测弹体的变形和损伤情况。

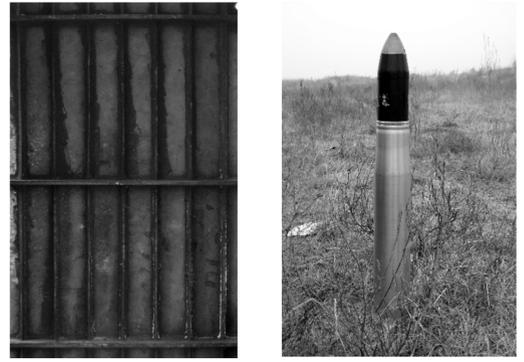


图 1 靶板与弹体

Fig. 1 Target and warhead

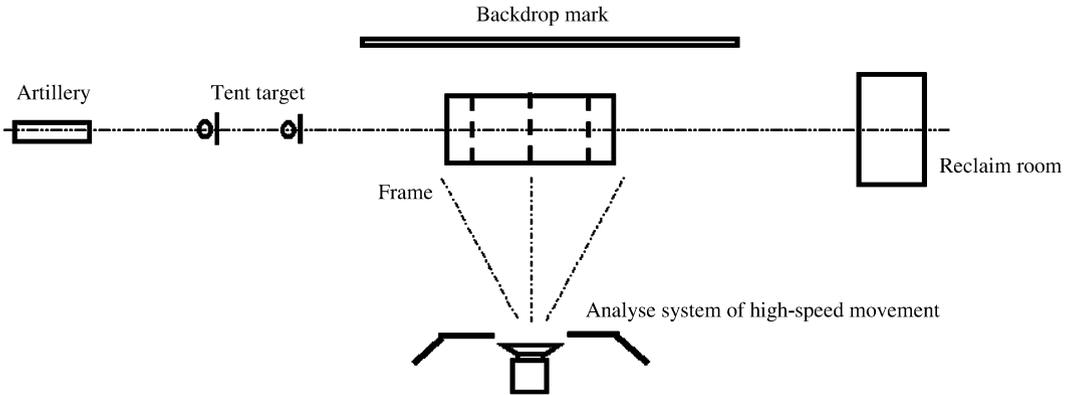


图 2 实验系统布局

Fig. 2 Experiment system

2.2 实验结果

本次实验共发射 6 发实验弹,弹速在 $600\sim 630$ m/s 之间,其中垂直侵彻均质靶板 2 发,斜侵彻加筋靶板 4 发, 15° 和 25° 各 2 发。观察大、小加强筋在弹体的贯穿过程中所起的作用,加强筋对靶板毁伤效果的影响以及弹体的变形情况,测量弹丸对均质靶板和加筋靶板侵彻前后弹道参数。图 3 是典型的高速运动分析系统的记录照片,表 2 为实验结果,图 4 为侵彻后靶板毁伤照片。弹孔直径约 115 mm。靶板整体变形呈碟型破坏,整体变形范围 350 mm。靶板呈花瓣型破坏,花瓣大部分折断与弹体脱离。弹体在侵彻贯穿过程中基本没有发生变形。

表 2 实验结果

Table 2 Experimental results

序号	弹重 /kg	靶板情况	弹着点		弹孔孔径 /mm	着靶速度 $v_0/(m/s)$	剩余速度 $v_r/(m/s)$
			距大筋/mm	距小筋/mm			
1	16.11	垂直、均质	—	—	115	606.9	583.6
2	16.13	垂直、均质	—	—	115	607.6	584.9
3	16.00	倾角 15° 、加筋	145.0	20.0	110	622.6	
4	16.00	倾角 15° 、加筋	57.5	27.0	110×120	620.2	588.3
5	16.00	倾角 25° 、加筋	18.5	28.5	110	626.0	570.5
6	16.00	倾角 25° 、加筋	242.5	38.5	110×120	623.2	591.5

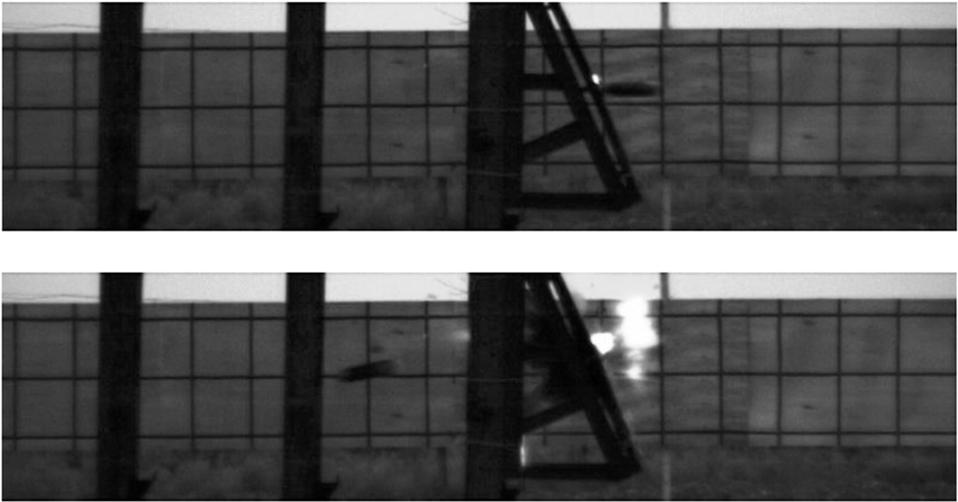


图 3 典型实验记录(倾斜 25° 侵彻加筋靶板)

Fig. 3 Typical record of experiment

2.3 实验结果分析

在本文的弹靶材料、侵彻速度条件下,从靶板破坏可以看出,靶板的主要破坏模式为冲塞和花瓣型破坏,弹孔基本呈圆形,弹孔直径和弹丸直径基本相等,弹孔崩落的面积近似等于弹丸横截面积。

对于在弹孔位置加强筋的破坏和变形,基本上被崩落或发生强烈的塑性弯曲,崩落的质量近似等于弹孔位置部分的加强筋质量。

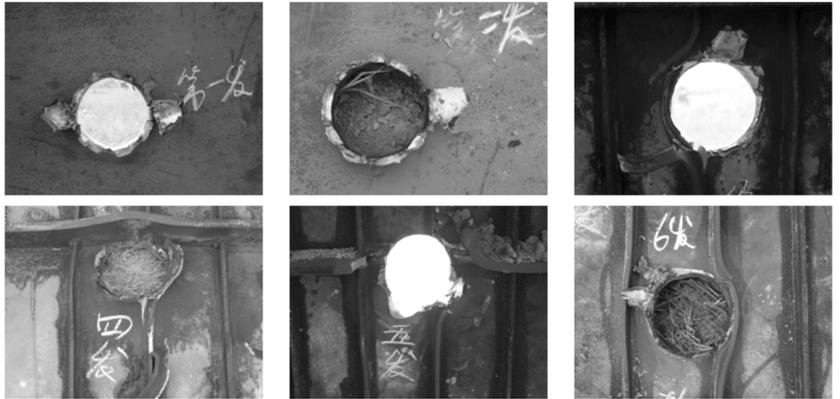


图 4 侵彻后的靶板

Fig. 4 Targets after being perforated

斜侵彻靶板后弹丸运动方向发生改变,另一方面,加强筋对弹丸运动方向和姿态都有较大影响。

3 弹丸侵彻均质靶板的极限穿透速度和剩余速度理论计算

假设:弹丸在极限穿透速度时的动能即为使钢甲刚好被冲塞击穿时所需的能量;塞块的运动速度与弹丸剩余速度相同;未发生剪切前忽略弹靶初始碰撞发生塑性变形而损失的能量。

则根据能量原理得

$$\frac{1}{2}Mv_0^2 = \frac{1}{2}Mv_c^2 + \frac{1}{2}Mv_r^2 + \frac{1}{2}mv_r^2 \tag{1}$$

式中: M 是弹丸质量; m 是塞块质量; v_0 是弹丸着靶速度; v_c 是极限穿透速度; v_r 是剩余速度。

剩余速度可以表示为

$$v_r = \sqrt{\frac{M(v_0^2 - v_c^2)}{M + m}} \tag{2}$$

对于均质靶板,有关极限速度的理论预测公式较多,这里取 K. A. 贝尔金公式^[4]的形式

$$v_c = 6.060 \sqrt{k\sigma_s(1 + \varphi)} D^{0.75} H^{0.7} / (M^{0.5} \cos\alpha) \tag{3}$$

式中： $\varphi=6.160C_e/C_m$ ， C_e 、 C_m 为相对厚度和相对质量，其表达式为 $C_e=H/D$ 、 $C_m=M/D^3$ (kg/m^3)；式中的 σ_s 、 H 、 D 、 M 、 α 分别为均质靶板的屈服强度、靶板的厚度、弹体的直径、弹体的质量和着角；式中的 k 为效力系数，对于钝头弹体

$$k = (2\sqrt{2}/3)C_e^{0.5} [0.2245i/(1+\varphi) + 0.034] \tag{4}$$

式中： i 是弹体的头部形状系数，其表达式为

$$i = [(8 - 5n_2)/15n_1] \sqrt{(1 - n_2)(2n_1 + n_2 - 1)} + n_2^2 \tag{5}$$

式中： n_1 为弹体部的曲率半径与弹体半径之比； n_2 为弹体头部钝化直径与弹体直径之比。

假设钢甲被弹丸撞击后，击出一个质量为 m 的钢塞块，这里取

$$m = K(\pi D^2/4)(H/\cos\alpha)\rho_t \tag{6}$$

式中： ρ_t 为装甲金属密度； K 为系数，表示靶板塞块或崩落面积与弹丸横截面积之比。在本文的弹靶材料、尺寸和侵彻速度条件下，由实验结果可知，靶板塞块或崩落面积与弹丸横截面积近似相等，所以这里取 $K=1$ 。

4 弹丸侵彻均质靶板的极限穿透速度和剩余速度理论计算

由于加强筋的存在，不同弹着点弹体侵彻结构靶板的厚度是不同的。为了求解弹体侵彻结构靶板时弹体的极限穿透速度和剩余速度，在上面的基础上再假设：

(1) 弹体侵彻加强筋时，被弹体侵彻冲塞或崩落的加强筋质量是弹孔与加强筋相交的部分质量；

(2) 弹体侵彻时，加强筋的等效厚度为弹孔内冲塞或崩落的加强筋的体积与弹孔横截面积的商，弹体侵彻的总的等效厚度是结构靶面板厚度与加强筋的等效厚度之和。

弹孔加强筋的相对位置如图 5、6 所示， S_0 、 S_1 、 S_2 分别为均质板上弹孔面积、被侵彻的大加强筋的面积、被侵彻的小加强筋的面积； H 是结构靶面板厚度； h_1 是大加强筋的高度； h_2 是小加强筋的高度； α 是弹丸着靶倾角。

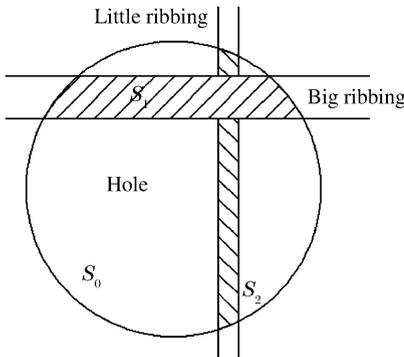


图 5 弹孔加强筋的相对位置

Fig. 5 Relative position of shoot hole and reinforce ribbing

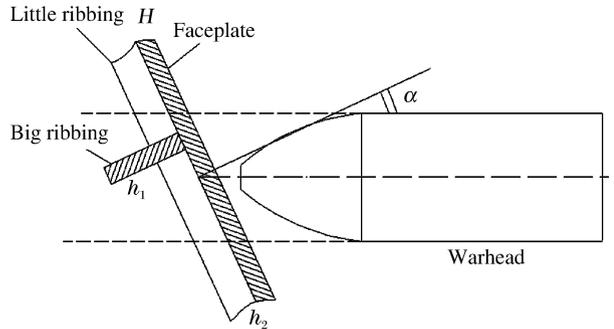


图 6 弹靶关系

Fig. 6 Relative chart of warhead and target

根据假设，可以得到被弹体侵彻的加强筋的体积

$$V_j = S_1 h_1 + S_2 h_2 / \cos\alpha \tag{7}$$

加强筋的等效厚度

$$H_j = V_j / S_0 = (S_1 h_1 + S_2 h_2 / \cos\alpha) / (\pi D^2 / 4) \tag{8}$$

弹体侵彻结构靶板的等效厚度

$$H_{dx} = H + H_j \tag{9}$$

弹体侵彻结构靶板材料的总塞块的质量

$$m_s = m + V_j \rho_t = K [(\pi D^2 / 4)(H / \cos\alpha) + (S_1 h_1 + S_2 h_2 / \cos\alpha)] \rho_t \tag{10}$$

同样这里取 $K=1$, 这时 $C_e = H_{dx}/D$ 。

结构靶板的极限穿透速度

$$v_c = 6\ 060 \sqrt{k\sigma_s(1+\varphi)} D^{0.75} H_{dx}^{0.7} / (M^{0.5} \cos\alpha) \quad (11)$$

则根据能量原理, 剩余速度

$$v_r = \sqrt{\frac{M(v_0^2 - v_c^2)}{M + m_s}} \quad (12)$$

5 理论预测与实验结果的比较

根据这里提出的弹体侵彻加强筋的理论方法, 对实验中弹体侵彻均质靶板和加筋结构靶板不同位置的几种工况进行了计算, 各种工况的实验结果和计算结果列在表3中。

表3 实验结果和理论计算结果

Table 3 Results of experiment and theory calculation

序号	$v_0/(m/s)$	$v_r/(m/s)$		速度降落/(m/s)		$v_c/(m/s)$	$(\Delta v_s - \Delta v_j) / \Delta v_j$
		实验	理论计算	实验 Δv_s	理论计算 Δv_j		
1	606.9	583.6	583.5	23.3	23.4	78.1	-0.004
2	607.6	584.9	584.1	22.7	23.5	78.1	-0.034
3	622.6		592.8		29.8	98.0	
4	620.2	588.3	590.8	31.9	29.4	93.1	0.085
5	626.0	570.5	569.2	55.5	56.8	159.6	-0.023
6	623.2	591.5	593.1	31.7	30.1	94.7	0.053

由表中数据可以看出, 在同样着靶速度、位置、倾斜角的条件下, 剩余速度的实验、理论计算值基本一致, 过靶前后速度降落的理论与实验的相对偏差最大为 8.5%。说明对于弹丸侵彻薄钢板的实验、理论方法基本正确, 得到的数据可靠。

6 小结

(1) 实验得到了弹丸垂直侵彻均质靶、斜加筋靶不同位置的多种着靶条件下的弹道变化参数;

(2) 从靶板破坏、高速录像和回收的靶板残片来看, 在本文的实验条件下, 靶板的主要破坏模式为冲塞和花瓣型破坏, 弹孔基本呈圆形, 弹孔直径和弹丸直径基本相等, 弹孔崩落的面积近似等于弹丸横截面积。

(3) 研究结果表明, 提出的结构靶加强筋的质量和厚度等效原则, 适合于弹丸侵彻薄结构钢板问题的研究, 提出的结构靶加强筋的质量和厚度等效模型可较好地预测弹丸正、斜侵彻加强筋结构靶的极限穿透速度, 进而预测弹丸过靶后的剩余速度。

本文的实验是在山东机器(集团)有限公司靶场完成的, 衷心感谢杨守杰副总经理、刘建波副总工以及参加实验的所有科研人员。

参考文献:

- [1] 叶本治, 黄启友, 戴君全, 等. 半穿甲反舰导弹战斗部的毁伤效果分析[J]. 爆轰波与冲击波, 1995, 3(1): 37—44.
- [2] 金建明, 唐平. 航舷结构与均质靶板的等效方法研究[J]. 弹道学报, 2000, 12(1): 83—87.
JING Jian-ming, TANG Ping. Research on equivalent method of shipboard structure to homogeneous target [J]. Journal of Ballistics, 2000, 12(1): 83—87.
- [3] 叶本治, 戴君全, 杨桂红. 超高速半穿甲弹丸壳体结构实验研究[J]. 爆炸与冲击, 1993, 13(2): 160—171.
YE Ben-zhi, DAI Jun-quan, YANG Gui-hong. Experimental research on structure of superhigh speed semi-armour-piercing warhead [J]. Explosion and Shock Waves, 1993, 13(2): 160—171.
- [4] 王儒策, 赵国志. 弹丸终点效应[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993.

The experimental and theoretical research for end-point trajectory of warhead penetrating ribbings structural target

DUAN Zhuo-ping*

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

Abstract: According to the structure of aircraft carrier and existing anti-ship missile warhead, the structural target with ribbings and experimental semi-armor-piercing warhead were designed with geometric similar principle. The processes of warhead penetrating the ribbings structural and homogeneous targets were investigated experimentally in the shooting range, and the end-point trajectory parameters in hitting conditions and the breakage mode of target were gained. On the basis of the theory of warhead penetrating homogeneous target and with the some hypothesis, the theoretical calculation model for end-point trajectory of warhead penetrating ribbings structural target was found. The results by theoretical calculation to residual velocity of warhead were consistent with that by experimental test.

Key words: mechanics of explosion; detonation dynamics; theory model; penetration experiment; semi-armor-piercing warhead; structural target with ribbing

* Corresponding author: DUAN Zhuo-ping
E-mail address: duanzp@bit.edu.cn
Telephone: 010-68461702