

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0414

带水墙靶板对高速破片侵彻能力影响规律*

陈 材¹, 石 全¹, 尤志锋¹, 郭驰名¹, 戈洪宇²

(1. 陆军工程大学, 河北 石家庄 050003;

2. 中国白城兵器试验中心, 吉林 白城 137001)

摘要: 针对大当量成型弹药破片毁伤威力试验风险系数大、试验效能低的问题, 提出采用带水墙靶板的方式对破片毁伤参数进行测定的新方法。应用动力学模拟软件 AUTODYN, 对破片侵彻带水墙靶板及无水墙靶板的过程进行了有限元数值模拟, 分析了水墙厚度和破片入射角度对破片侵彻能力的影响规律, 通过实弹试验的方式对带水墙靶板的实用效果进行了验证。计算结果表明, 带水墙靶板相比无水墙靶板, 能够大大降低破片的侵彻能力, 同时与实弹试验效果也能较好吻合, 说明在实际试验中使用带水墙靶板收集破片毁伤参数的方法是可行的。

关键词: 毁伤试验; 水墙; 靶板; 高速破片

中图分类号: O382; TP391.9

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

随着国际形势的发展, 核武器的使用和研究受到了极大的限制, 使得非核杀伤的大当量弹药在现代战争中的使用频率及发挥的作用越来越大, 其产生的高速破片能够对人员和装备产生巨大的杀伤作用。目前, 为了切实提高部队实战化水平, 打赢高新技术条件下的现代战争, 必须要求部队的作战训练更加贴近于实战^[1]。因此, 在装备战斗损伤试验中将越来越多的使用大当量成型弹药来进行装备打击试验。为使试验方案设计更为合理, 就必须先对大当量成型弹药的毁伤威力进行分析。

破片毁伤参数是评定弹药毁伤威力的重要指标, 其计算数据主要通过破碎性试验和飞散性试验来进行获取。破碎性试验的目的是回收弹药爆炸后的破片并按质量分组获取破片质量分布, 飞散性试验的目的则是获取空间各个位置上破片的分布密度。针对小当量弹药, 张志彪等^[2]采用砂箱静爆法回收了变壁厚壳体膨胀破碎生成的自然破片, 宋桂飞等^[3]设计了一种新型爆炸容器装置来进行战斗部的回收, 能够反复使用且有效回收爆炸试验后的破片, 张玉令^[4]采用长方形靶测试法对自制弹丸的破片空间分布情况进行了测量, 毛亮等^[5]通过布置环形靶的方式对可瞄准预制破片式战斗部的破片分布进行了分析, 除此之外, 在相关专业教材上也对破碎性试验和飞散性试验的方法进行了介绍和分析^[6-8], 这些研究主要是针对小当量弹药进行, 对于大当量弹药的破片毁伤参数测量, 虽有少数学者进行了研究, 如王林等^[9]通过改变靶板材料和布靶方式, 对大当量杀伤战斗部的破片飞散特性试验方法进行了研究, 但仍缺乏系统的试验标准规范。此外, 现有的试验方法, 均不能实现对大当量弹药破碎性试验和飞散性试验的同时实施, 只能通过增加试验次数或提高对试验场地的要求来达到获取完整的破片毁伤参数的目的。然而, 对于大当量成型弹药, 其不仅造价高昂, 同时毁伤威力巨大, 试验次数的增加将大大提高试验成本和试验风险系数, 而提高试验场地要求的方法则将大大降低试验效率。因此, 探寻一种简单易行的大当量成型弹药破片毁伤参数试验新方法, 对于降低试验费效比具有十分重要的现实意义, 同时也能对大当量弹药毁伤参数测试试验方法的完善提供一定的思路。

本文中提出在靶板前方设置水墙的试验方法, 实现对破片破碎性数据和飞散数据的同时获取。利用数值模拟的方式, 分析破片打击带水墙防护靶板的侵彻规律, 并分析水墙厚度和破片入射角度对破片

* 收稿日期: 2018-10-29; 修回日期: 2019-04-03

基金项目: 国家自然科学基金(71401173)

第一作者: 陈 材(1990—), 男, 博士研究生, caichen20091165@126.com。

侵彻能力的影响规律。在此基础上,通过实弹试验的方式,验证带水墙靶板收集大当量弹药高速破片的有效性。

1 试验原理

针对弹药破片的毁伤威力参数,通常采用静爆试验的方式来进行获取。如图 1 所示,为某型弹药静爆试验场地布置示意图及现场图,通过在弹药一侧按照角度分布布置一定数量的金属靶板,在弹药爆炸后收集靶板上的穿孔及凹坑数量,则可得到相应飞散区间的破片数量,从而推算出弹药破片场的整体分布。对于大当量战斗部,例如航弹,其破片初速通常为 2 000~2 500 m/s,因此在破片密度较大的距离内,破片几乎都能够穿透靶板,这就造成在一次试验中无法同时获取破片质量数据。因此,本文通过在靶板前方设置水墙的方式,旨在快速降低破片侵彻能力,弥补常规试验方法无法同时收集破片质量数据的缺陷,其示意图如图 2 所示。

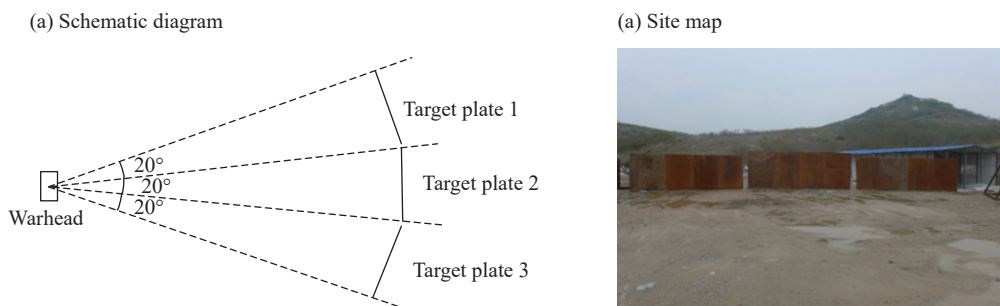


图 1 静爆试验布置图

Fig. 1 Layout of static explosion test

2 数值模拟模型

2.1 有限元模型的建立

利用有限元模拟软件 AUTODYN 对高速破片侵彻带水墙靶板过程进行数值模拟。以方形破片为例,其尺寸为 $7\text{ mm}\times 7\text{ mm}\times 7\text{ mm}$,质量约为 3 g,进入水墙时初速为 1 500 m/s;靶板厚度为 3 mm,长宽尺寸为 $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$,其四周设置为刚性固定,达到模拟试验场中靶板固定的效果。为了模拟破片在空气中飞行及穿越水墙的过程,在破片及靶板四周建立尺寸为 $100\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 的空气域,并通过填充的方式将空气替换为水,由此建立靶板前方水墙的数值模型。破片和靶板均采用 Lagrange 单元算法,空气和水采用 Euler 单元算法,并在空气和水域边界处设置 Flow-out 边界条件,实现空气和水域中边界能量的流出。所有模型单元网格大小均为 1 mm。采用流固耦合算法定义破片与空气、水墙以及水墙与靶板之间的相互作用,通过侵蚀接触算法模拟破片侵彻靶板的过程。由于实际试验中水墙与靶板不能完全贴合,因此在水墙和靶板之间设置 2 mm 的间隙。建立好的有限元模型如图 3 所示。

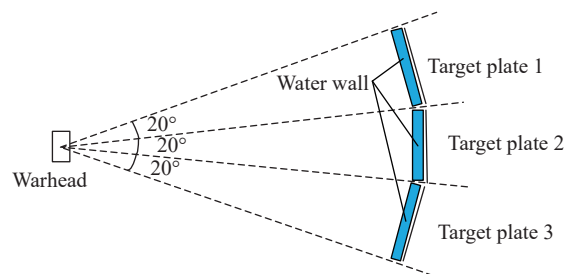


图 2 水墙防护靶板示意图

Fig. 2 Schematic diagram of target plates with water walls

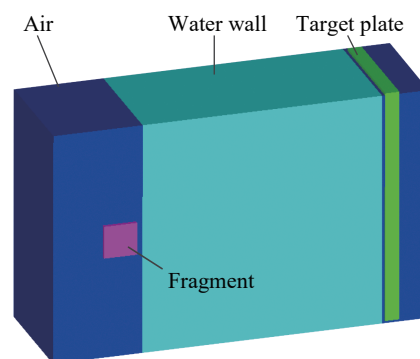


图 3 有限元模型 (1/2 模型)

Fig. 3 The finite element model (1/2 model)

2.2 材料模型的建立

2.2.1 破片及靶板材料模型

破片材料选用钨合金, 靶板材料选用钢。使用 Shock 状态方程和 Johnson-Cook 强度模型来对两种材料进行描述。

Shock 状态方程表达式为 $u_s = c + s_1 u_p + s_2 u_p^2$, 在强冲击条件下, 对于大多数材料而言, 其表达式可以满足 $u_s = c + s_1 u_p$ 。两种材料的参数如表 1 所示。

表 1 状态方程参数^[10-11]

Table 1 Parameters for equations of state^[10-11]

材料名称	密度/(Mg·m ⁻³)	Grüneisen系数	c/(km·s ⁻¹)	s ₁	参考温度/K	比热/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
钨合金	17.8	1.54	4.03	1.237	300.0	134
钢	7.8	1.6	3.98	1.58	300.0	408

Johnson-Cook 强度模型通常用于具有高应变率和承受高温的金属材料, 该模型中其屈服应力 Y 由材料的应变、应变率和温度决定:

$$Y = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \lg \dot{\varepsilon}_p^*) (1 - T_H^m) \quad (1)$$

$$T_H = (T - T_{room}) / (T_{melt} - T_{room}) \quad (2)$$

式中: ε_p 为有效塑性应变, $\dot{\varepsilon}_p^*$ 为参考有效应变率, T_H 为相对温度, T 为试验时材料温度, T_{melt} 为材料熔化温度, T_{room} 为室温; A 、 B 、 C 、 n 和 m 均为常数, 它们的数值是由材料本身决定的, 均可由试验测得。两种材料的强度模型参数如表 2 所示。

表 2 强度模型参数^[10-11]

Table 2 Parameters for strength models^[10-11]

材料	A/GPa	B/GPa	n	C	m	T _{melt} /K
钨合金	1.200	0.177	0.12	0.016	1.0	1 748
钢	0.95	0.611	0.26	0.014	1.0	1 818

2.2.2 空气及水的材料模型

采用理想气体状态方程对空气进行描述:

$$p_1 = (\gamma - 1)\rho_a e + p_{shift} \quad (3)$$

式中: p_1 为空气压力, ρ_a 为空气初始密度, γ 为理想气体常数, e 为比热力学能, p_{shift} 为压力偏移量。在空气模型中, 取 γ 为 1.4, ρ_a 为 1.225 kg/m³, e_a 则取为 206.8 J/g。

对水采用 NULL 材料模型, 其状态方程采用 Grüneisen 状态方程^[12]:

$$p = \frac{\rho_0 c_0^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{1 + \mu} - S_3 \frac{\mu^3}{(1 + \mu)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + \alpha\mu)E \quad (4)$$

式中: p 为压力, E 为体积内能; c_0 为介质中初始声速, 取为 1 480 m/s; S_1 、 S_2 、 S_3 为冲击波输入参数, 通常根据水介质的冲击试验数据确定, 本文取 $S_1=1.75$, $S_2=0$, $S_3=0$; ρ_0 为常温下水的初始密度, ρ 为水当前密度; μ 为介质压缩比, $\mu=\rho/\rho_0-1$; γ_0 为初始 Grüneisen 系数, 取为 0.493 4; α 为 Grüneisen 系数修正项。

3 数值模拟结果及分析

3.1 高速破片侵彻过程

对破片侵彻带水墙靶板的过程进行数值分析, 得到破片不同侵彻状态信息如图 4 所示, 其中

图 4(a)~4(d) 为水墙中冲击波压强云图, 图 4(e)~4(f) 为金属材料内部应力云图。

由图 4 可知, 破片进入水墙的初始时刻, 由于水的惯性压力, 使得破片与水的接触区域产生巨大的压力, 水墙中由于破片的冲击产生冲击波, 冲击波随着破片的前进不断向前传播, 并始终领先于破片。因此, 冲击波首先与靶板接触, 由于靶板的阻挡作用, 冲击波在靶板表面产生反射, 并与还未到达靶板的冲击波产生重叠, 在交界面处产生更高的冲击波超压, 在超压作用下, 靶板产生一定的塑性变形, 破片则是速度进一步下降。当破片穿透水墙后, 继续以剩余速度对靶板进行侵彻, 并最终穿透靶板。

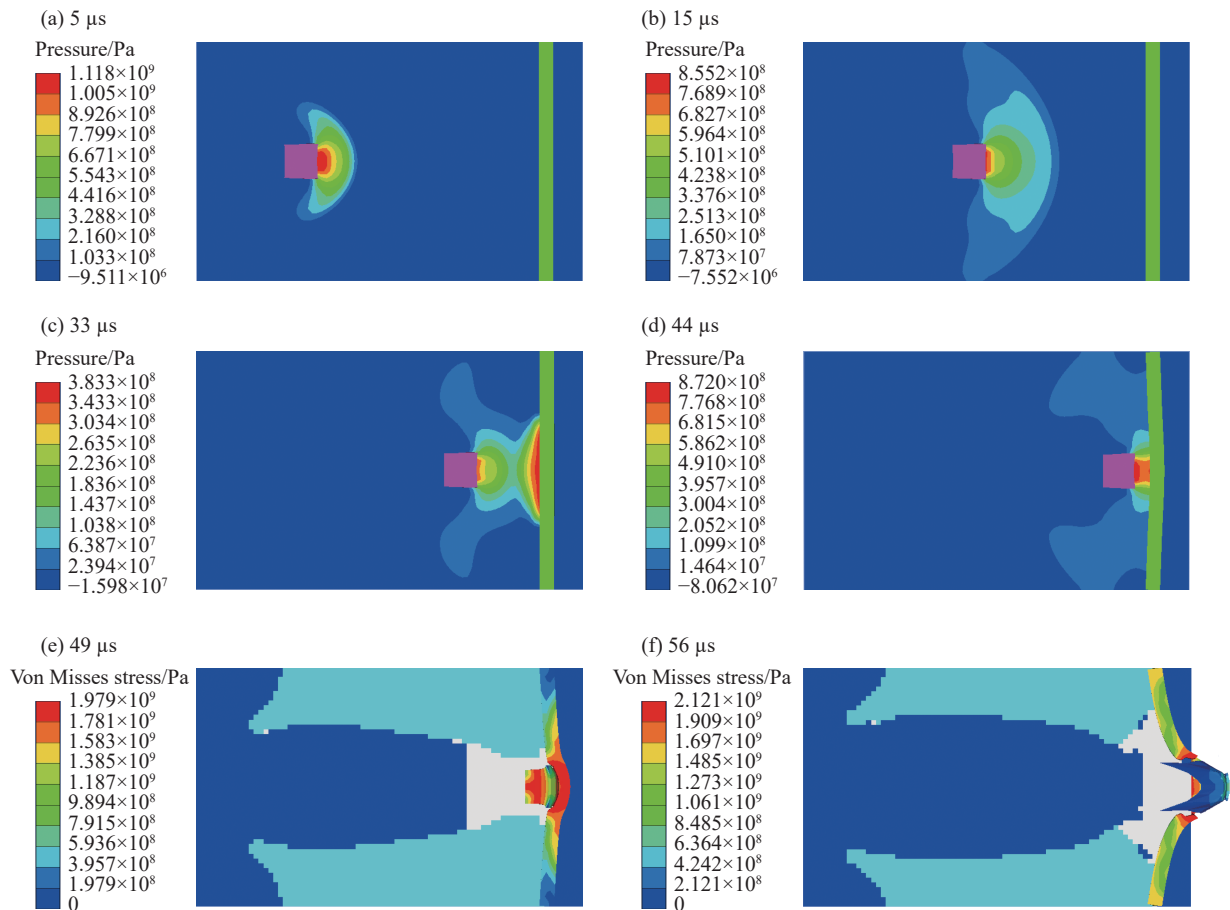


图 4 不同时刻破片侵彻带水墙靶板的典型状态

Fig. 4 Typical states of a fragment penetrating into a target plate with a water wall at different times

破片从初始时刻到穿透靶板的时间段内, 记录其速度变化数据如图 5 所示, 同时记录破片侵彻无水墙防护靶板时速度变化数据如图 6 所示。

由图 5 可知, 当靶板前方有水墙防护时, 破片侵彻靶板分为 2 个阶段: 第 1 个阶段为穿越水墙阶段, 即高速破片在 0~88 μs 时间段内对水墙进行了穿越, 在此过程中, 破片速度从 1 500 m/s 下降至 1 010 m/s, 下降幅度为 32.7%, 其中在 67~88 μs 过程中, 由于冲击波在靶板作用下形成的反弹叠加作用, 使得破片下降速率有所加大, 但由于破片与冲击波接触面积较小, 因此下降幅度不大; 第 2 个阶段为侵彻靶板阶段, 即在 88~120 μs 时, 破片开始侵彻靶板, 前期由于水墙的缓冲作用, 破片在侵彻靶板过程中速度降低较为平缓, 侵彻时间也持续较长, 最终的剩余速度为 599 m/s, 相比初始速度下降幅度为 60.1%。由图 6 可知, 当靶板前方无水墙防护时, 在 0~68 μs 时间段内, 破片在空气中飞行, 其速度在此过程中几乎没有下降, 在 68 μs 时, 破片与靶板接触并开始侵彻靶板, 整个侵彻过程在 83 μs 时结束, 随后破片继续向前飞行, 此时破片剩余速度为 1 128 m/s, 相比初始速度下降幅度为 24.8%。因此由图 5~6 可知, 水墙对于高速破片的侵彻能力具有明显的降低作用, 相比无水墙防护状态, 速度能够多下降 35.3%。

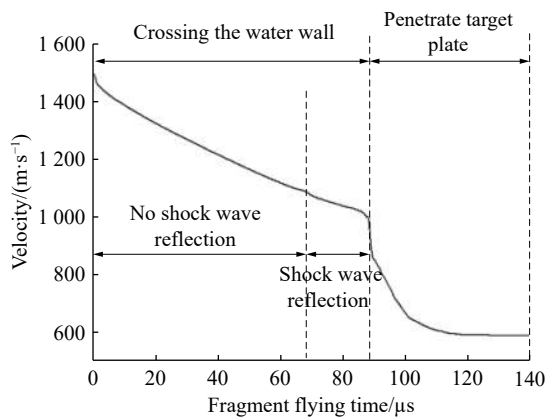


图 5 破片侵彻带水墙靶板速度变化曲线

Fig. 5 Velocity-time curve of the fragment penetrating into the target plate with the water wall

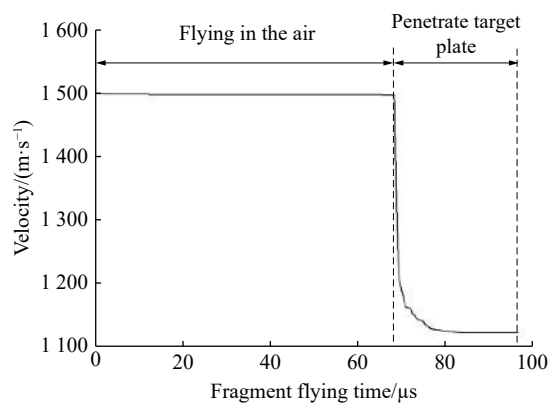


图 6 破片侵彻无水墙靶板速度变化曲线

Fig. 6 Velocity-time curve of the fragment penetrating into the target plate without the water wall

3.2 水墙厚度对高速破片侵彻能力的影响

设置水墙初始厚度为 40 mm, 按照每次增厚 10 mm 的速度进行递增, 对初速为 1 500 m/s 的破片侵彻具有不同厚度水墙防护的靶板过程进行数值模拟, 得到破片剩余速度如图 7 所示。

由图 7 可知, 破片侵彻带水墙防护靶板的剩余速度同靶板厚度呈线性关系, 在破片质量、形状和靶板厚度不变的情况下, 破片侵彻靶板的剩余速度随着水墙厚度的增大而降低, 平均每增厚 10 mm 水墙, 破片速度下降约 40 m/s。利用拟合曲线进行计算可得, 当水墙厚度增大为 287 mm 时, 破片的剩余速度可降低为零。因此, 理论上当破片速度为 1 500 m/s 时, 对于 3 mm 厚的靶板, 只需在其前方设置厚度为 287 mm 的水墙, 即可实现对垂直入射的高速破片的拦截和收集。

3.3 入射角度对高速破片侵彻能力的影响

设破片入射角为 α , 其值为破片入射方向同靶板平面法线之间夹角的大小, 如图 8 所示。

在实际试验中, 除部分破片能以 $\alpha=0^\circ$ 的入射角对靶板进行侵彻外, 其余破片的入射角 α 均不为 0° 。因此, 当高速破片速度为 1 500 m/s, 水墙厚度为 50 mm, 靶板厚度为 3 mm 时, 对破片以不同入射角度侵彻带水墙靶板的过程进行数值模拟, 得到破片在与靶板作用后剩余速度绝对值的变化规律如图 9 所示。

由图 9 可知: 当破片入射角度为 $0^\circ\sim 54^\circ$ 时, 随着破片入射角度的增大, 其穿透靶板后的剩余速度逐渐降低, 即破片的侵彻能力逐渐降低, 这主要是因为随着入射角度的增大, 破片穿越水墙的实际距离逐渐增大, 等效于破片垂直穿越时水墙厚度的增大, 从而造成破片速度的降低; 当破片入射角度为 $54^\circ\sim 58^\circ$ 时, 破片速度降为 0, 此时破片处于嵌入未穿透靶板的状态; 当入射角度大于 58° 后, 破片速度又迅速升高, 这是因为破片在 x 轴方向上的速度随着入射角度的加大逐渐降低, 最终破片穿越水墙后在 x 方向上的剩余速度不足以穿透和嵌入靶板, 而 y 方向上的速度仍然较高, 从而在靶板表面产生跳飞现象。

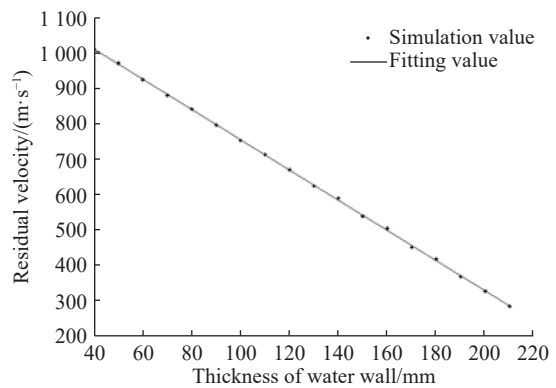


图 7 破片的剩余速度

Fig. 7 Residual velocities of fragments

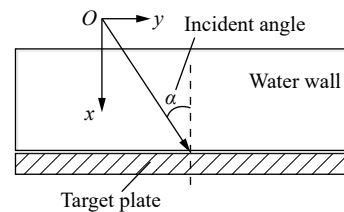


图 8 入射角度示意图

Fig. 8 Schematic diagram of incident angle

象,并继续朝着靶板周边飞散。由此可知,在进行实际试验时,对于不会产生跳飞现象的破片,只要达到能够收集垂直入射破片的条件,就能保证收集到非垂直入射的破片。而对于跳飞破片,其往往产生于入射角度较大时,虽然在实际试验中可通过调整弹药与靶板之间距离和角度进行避免,但为了保证试验的高精度,可对靶板进行适当改造,以实现跳飞破片的拦截和收集。

4 试验验证

为验证带水墙靶板收集高速破片方法的有效性,在进行数值模拟的基础上,开展某型航弹破片采集试验。弹药等效 TNT 装药质量约为 124 kg,内部构造如图 10 所示,其破片类型为方形预制破片,分别排布于装药顶部和尾部两端,呈轴对称分布,破片尺寸及材料与 2.1 节数值模拟试验中的破片相同。由于破片分布的对称性,在实际试验中只需对一侧破片进行收集即可。

为使破片到达水墙时的速度同数值模拟模型中的入水速度相同,即达到约为 1 500 m/s,首先利用金属丝网靶法对弹药爆炸后破片空中飞行速度衰减规律进行测算,试验示意图和现场图如图 11 所示。在战斗部一侧布设 3 组测速靶,3 组测速靶靶间间隔相同,设战斗部同靶 1 之间间距为 X_1 ,靶间间距分别为 X_2 、 X_3 、 X_4 。通过记录破片切断金属丝产生的电压脉冲信号,就可测得破片通过距离 $X_i(i=1, 2, 3, 4)$ 时的时间 $t_i(i=1, 2, 3, 4)$,以此便可求得破片空中飞行的速度衰减公式,具体计算过程见文献 [8]。通过计算,可得到在距离弹药爆心 20 m 处破片速度约为 1 500 m/s。

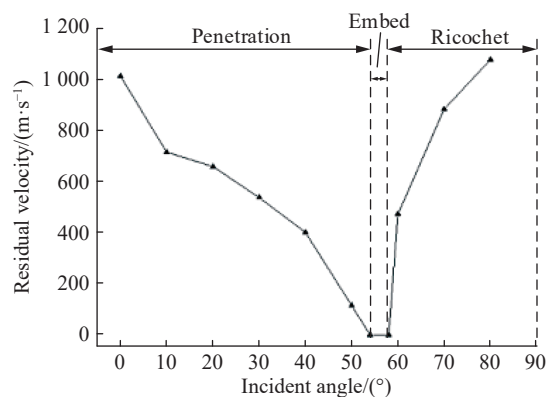


图 9 破片剩余速度随入射角度的变化

Fig. 9 Variation of residual velocity of fragment with incident angle

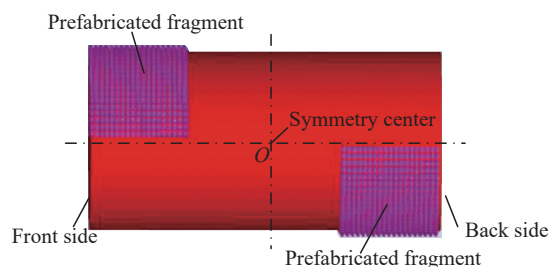
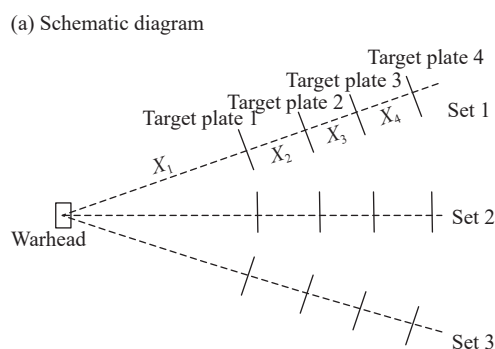


图 10 弹药破片分布模型

Fig. 10 Distribution model of fragments



(b) Site map



图 11 测速靶的布设

Fig. 11 Layout of velocity measurement targets

又由 3.2 节分析可知,为顺利收集到破片,需在靶板前方设置至少 287 mm 厚的水墙,考虑以相应尺寸长方体容器盛水建立水墙难度较大,同时为了保证每枚破片在穿透水墙的过程中受其他破片影响较小,因此借鉴有限元计算思想^[13],将单瓶矿泉水以交错累加的方式固定在靶板前方模拟水墙。单瓶矿泉水瓶身平均直径为 62 mm,考虑矿泉水瓶之间间隙的影响,将矿泉水瓶交错叠加,共叠加 10 层,从而保证每枚破片穿越的水墙厚度均大于等于 287 mm。同时,靶板四周通过焊接的方式构造金属罩结构,将水墙

进行包围,防止破片非垂直入射或在侵彻过程中轨迹发生变化,产生跳飞现象后向四周飞散而无法收集。通过以上分析,布置试验场地如图 12 所示。靶板为 3 mm 厚的钢板,长宽尺寸为 4 m×3 m,通过刚性支架固定于地面。试验弹药通过木质支架进行固定,支架高度 H 为 1.5 m,将弹药尾部一侧破片对准靶板中心,弹药中心与靶板表面垂直距离 R 为 20.6 m,由三角函数关系可分别求得尾部破片中心同靶板长和宽的夹角 β 和 γ 。

弹药爆炸后,在矿泉水瓶中共收集到 20 枚破片,如图 13 所示,在靶板上及靶板周边区域收集到 30 枚破片,靶板上无破片穿透后形成的破孔。设靶板面积为 S ,此时 S 即为半径为 R 的破片场在纬角 β 和经角 γ 内的球面面积 S_R 的投影面积,通过求解球面面积 S_R ,同时结合收集到的破片数量 N ,即可计算得到该区球面上破片的球面密度 ρ ,具体计算方法在文献 [14] 中有详细介绍,在此不再赘述。同时,对破片质量进行测量,可得 50 枚破片质量分布如图 14 所示,平均质量约为 1.67 g。

比较相同试验条件下无水墙靶板的试验情况如图 15 所示,在一次试验中,由于破片穿透靶板,因此只能收集到破片场球面在靶板投影面积上的破片数目,以此求取对应区域球面上破片的球面密度,而无法同时获取破片破碎性数据,由此证明本文中提出的收集高速破片毁伤参数的试验方法是可行的。

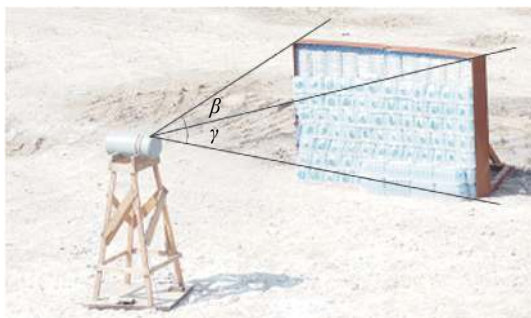


图 12 破片收集试验现场布设

Fig. 12 Site layout for collection of fragments

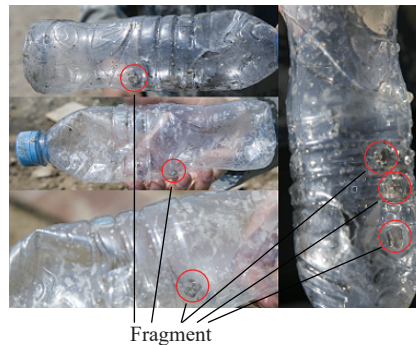


图 13 收集的部分破片

Fig. 13 Partial fragments collected

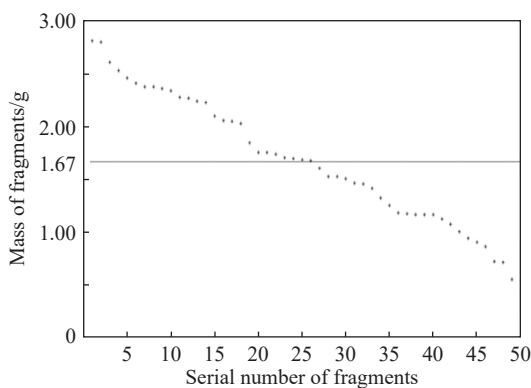


图 14 破片质量统计

Fig. 14 Mass statistics of fragments

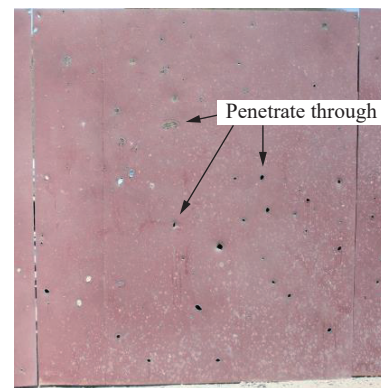


图 15 无水墙靶板试验情况

Fig. 15 Test situation of the target plate without a water wall

5 结 论

(1)通过在靶板前方设置水墙的方式,能够显著降低高速破片的侵彻能力,在相同模拟工况下,相比侵彻无水墙防护靶板情况,破片侵彻带水墙防护靶板后的剩余速度能够多下降 35.3%。

(2)在相同模拟工况下,随着水墙厚度的增大,高速破片的侵彻能力逐渐下降,且下降幅度同水墙厚

度呈线性关系。

(3)在相同工况下,随着破片入射角度的增大,高速破片的侵彻能力逐渐下降,当入射角度增大到一定程度时,破片还将产生嵌入和跳飞的现象,在实际试验中需针对此类现象做相应对策,避免所收集破片数据的不全面。

(4)通过实弹试验的方式,实现了对高速破片空间飞散数据和破碎性数据的同时收集,达到了减少大当量弹药爆炸次数的目的,验证了本文中所提出的利用带水墙靶板收集高速破片毁伤数据方法的正确性和有效性。

参考文献:

- [1] 吴晓颖,李帆,张万君,等.装备毁伤模拟试验方案的设计与优化[J].*四川兵工学报*,2014,35(10):5-7. DOI: 10.11809/scbgxb2014.10.002.
WU Xiaoying, LI Fan, ZHANG Wanjun, et al. Design and optimization of equipment damage simulation test [J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2014, 35(10): 5-7. DOI: 10.11809/scbgxb2014.10.002.
- [2] 张志彪,黄风雷.内部爆炸加载下变壁厚壳体破碎性研究[J].*北京理工大学学报*,2015,35(10):1001-1005. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2015.10.003.
ZHANG Zhibiao, HUANG Fenglei. Study of variable wall thickness shell fragmentation under internal explosive loading [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2015, 35(10): 1001-1005. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2015.10.003.
- [3] 宋桂飞,李成国,夏福君,等.回收战斗部破片的新型爆炸容器及应用[J].*爆炸与冲击*,2008,28(4):372-377. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1455.2008.04.015.
SONG Guifei, LI Chengguo, XIA Fujun, et al. A new explosion vessel used to recover warhead fragments and its application [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008, 28(4): 372-377. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1455.2008.04.015.
- [4] 张玉令.群爆弹药破片初始场及其设防安全距离研究[D].石家庄:军械工程学院,2012:46-54.
- [5] 毛亮,姜春兰,严翰新,等.可瞄准预制破片战斗部数值模拟与试验研究[J].*振动与冲击*,2012,31(13):66-70,75. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2012.13.014.
MAO Liang, JIANG Chunlan, YAN Hanxin, et al. Numerical simulation and experiment on aimable warhead of premade fragment [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(13): 66-70, 75. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2012.13.014.
- [6] 隋树元,王树山.终点效应学[M].北京:国防工业出版社,2000:65-102.
- [7] 熊志平. GJB 3197-1998 炮弹试验方法[S]. 1998:94-108.
- [8] 张国伟.终点效应及靶场试验[M].北京:北京理工大学出版社,2009:265-282.
- [9] 王林,刘永付,李晓辉,等.大当量杀伤战斗部破片飞散特性试验方法研究[J].*弹箭与制导学报*,2012,32(6):68-70. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9728.2012.06.020.
WANG Lin, LIU Yongfu, LI Xiaohui, et al. Study on the scatter of high capacity head fragments [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2012, 32(6): 68-70. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9728.2012.06.020.
- [10] 宋顺成,王军,王建军.钨合金长杆弹侵彻陶瓷层合板的数值模拟[J].*爆炸与冲击*,2005,25(2):102-106. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1455.2005.02.002.
SONG Shuncheng, WANG Jun, WANG Jianjun. Numerical simulation for penetration of ceramic composite plate by long-rod projectile of tungsten alloy [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(2): 102-106. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1455.2005.02.002.
- [11] 徐金中,汤文辉.钨合金长杆弹侵彻玻璃靶板的 SPH 方法数值模拟[J].*弹箭与制导学报*,2008,28(6):95-98,108. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9728.2008.06.027.
XU Jinzhong, TANG Wenhui. Numerical simulation with SPH method for long rod tungsten alloy projectile penetration into glass [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2008, 28(6): 95-98, 108. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9728.2008.06.027.
- [12] 康德,严平.基于 LS-DYNA 的高速破片水中运动特性流固耦合数值模拟[J].*爆炸与冲击*,2014,34(5):534-538. DOI:

10.11883/1001-1455(2014)05-0534-05.

KANG De, YAN Ping. Movement characteristics of high-velocity fragments in water medium: numerical simulation using LS-DYNA [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(5): 534–538. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)05-0534-05.

[13] 张洪才, 何波. 有限元分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 1–3.

[14] 翁佩英, 任国民, 于骥. 弹药靶场试验 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1996: 101–108.

Influences of target plates with water walls on penetration capability of high-velocity fragments

CHEN Cai¹, SHI Quan¹, YOU Zhifeng¹, GUO Chiming¹, GE Hongyu²

(1. *Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, Hebei, China;*

2. *Baicheng Ordnance Test Center of China, Baicheng 137001, Jilin, China*)

Abstract: To overcome the high-risk and low-efficiency problems in large-volume ammunition fragmentation tests, a new method was proposed by setting water walls in front of target plates for comprehensively collecting the damage parameters of the fragments. The dynamic simulation software AUTODYN was used to simulate the penetration processes of the fragments into the target plates with the water walls and without the water walls. The influences of the thickness of the water wall and the incident angle of the fragment on the penetration capability was analyzed, and the effectiveness of the proposed method was verified by the test. The calculation results show that compared with the target plates without the water walls, the target plates with the water walls can greatly reduce the penetration capability of fragments. The results are also in good agreement with the test data, which indicates that it is feasible to use the target plates with the water walls to collect the damage parameters of the fragments in the actual tests.

Keywords: damage test; water wall; target plate; high-velocity fragment

(责任编辑 张凌云)