

文章编号: 1001-1455(2004)05-0431-06

弹体侵彻带加强筋结构靶的实验研究^{*}

张中国, 黄风雷, 段卓平, 宋卫东, 宁建国

(北京理工大学爆炸灾害预防、控制国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 以舰船结构为目标, 设计了带加强筋的结构靶, 并用模拟装药弹体对单层或多层模拟结构靶进行了侵彻实验。根据实验结果, 建立了弹体侵彻结构靶板的剩余速度公式。分析了加强筋对靶板破坏模式和弹道参数的影响, 对靶板吸收能量的情况进行了分析。结果表明, 对于塑性较差的靶板, 加强筋的刚度作用是影响靶板能量吸收和破坏模式的主要因素。实验结果对加筋防护结构的设计具有一定的参考价值。

关键词: 固体力学; 侵彻; 模拟实验; 加强筋结构靶; 弹体

中图分类号: O385 国标学科代码: 130°1515 文献标志码: A

1 引言

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。然而, 尽管人们对弹体的侵彻机理进行了大量的研究, 但研究的主要内容大都局限于战斗部对均质靶板的侵彻, 且弹体的着速较低。对于具有 680 ~ 850m/s 初速的弹体侵彻带加强筋结构靶的研究未见报道。

本文中对结构弹体侵彻带加强筋结构靶的实验研究进行了初步的探讨。以舰船典型结构为目标, 研究其目标特性, 按“几何相似、刚度等效”的原则, 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^[1], 设计了模拟弹体, 并进行弹体对结构靶板的侵彻实验, 研究了加强筋对结构靶板的作用。同时, 根据靶板的破坏模式以及弹体的变形程度, 建立了的弹体剩余速度计算公式, 并进行了数值模拟计算, 理论计算和数值计算结果均与实验结果吻合较好。

2 实验方法

实验利用 100 高线膛炮加载, 网靶测速, 并采用高速运动分析系统, 记录弹体的飞行姿态, 采用土堆回收法回收弹体。靶场实验系统的布局如图 1 所示。

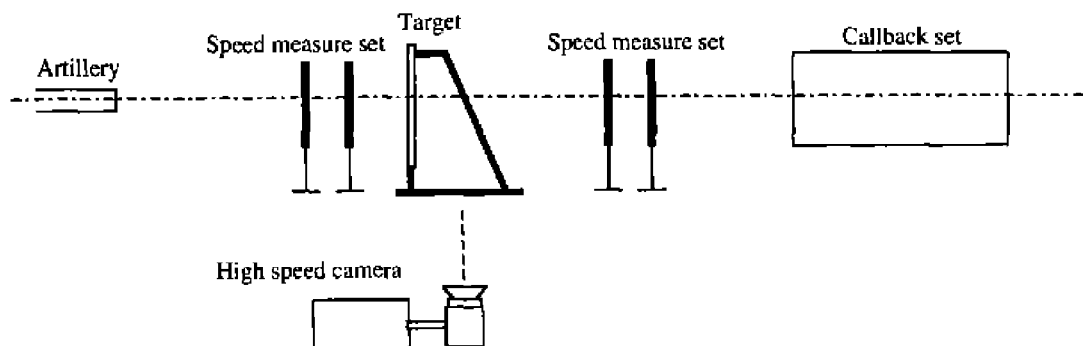


图 1 实验系统

Fig. 1 Experimental system

* 收稿日期: 2003-09-08; 修回日期: 2003-10-29

作者简介: 张中国(1964—), 男, 博士。

弹体材料为 30CrMnSiNi2A, 为了增强弹体的韧性, 以 300 °C 左右的温度对弹体进行回火; 为提高弹体的贯穿能力, 增加弹体头部的硬度, 对弹头部分以 (900 ± 10) °C 的温度进行淬火。弹体材料在热处理前的力学性能为: 静态强度极限 $\sigma_b = (1.6 \sim 1.7) \text{GPa}$, 屈服极限 $\sigma_s = 1.4 \text{GPa}$, 延伸率 $\delta = 9 \sim 10$, 面缩率 $\psi = 48 \sim 52$, 冲击韧性 $\alpha_k = (0.6 \sim 0.87) \text{MJ/m}^2$ 。

实验模拟靶采用加筋结构, 几何参数为: 均质板厚 16mm, 大筋高 71mm, 宽 10mm, 小筋高 26mm, 宽 6mm, 其余尺寸如图 2 所示。

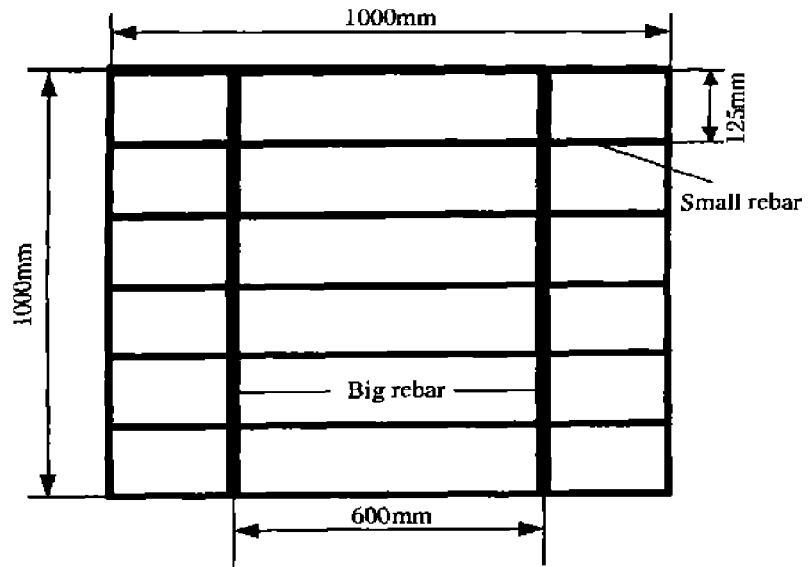


图 2 实验结构靶

Fig. 2 Structural target

3 实验结果及讨论

利用上述弹靶系统进行侵彻实验, 实验结果和靶板的吸能情况如表 1 所示。

3.1 侵彻过程的能量分析

弹体贯穿靶板后, 弹、靶系统所吸收的能量由下式计算

$$\Delta K = m(v_0^2 - v_r^2)/2 - \Delta E \quad (1)$$

式中: m 为弹体的质量, v_0 为弹体的初速度, v_r 为弹体剩余速度, ΔE 为尾翼断裂吸收的能量, $\Delta E = A\alpha_k$ 。叶片材料为 LY-12, 每发弹尾翼有 6 片叶片。为了充分估计尾翼断裂所吸收的能量, 叶片断裂的能量可参考材料的冲击韧性与断裂面积的乘积来计算, 且取该种材料断裂韧性的最大值: $\alpha_k = 290 \text{kJ/m}^2$; 断裂处的截面面积 A 也取最大值: 认为断裂处无销钉孔, 即叶片断口为长 20mm、宽 6mm 的矩形截面, 面积 $A = 120 \text{mm}^2$, 所以每发弹体叶片断裂时所吸收的最大总能量

$$\Delta E_T = 6A\alpha_k = 208.8 \text{J} \quad (2)$$

考虑到实验靶板材料的塑性较差, 弹体着靶的速度又较高, 且实验外场的温度较低, 靶板表现出明显的脆性; 从回收到的弹体的变形情况看, 弹体吸收的能量相对较少。所以可按上式计算出每层靶板所吸收的能量, 如表 1 所示。

表 1 实验结果及靶板吸收的能量

Table 1 Experimental results and energy absorbed by target

弹号	摄影测速/(m/s)	剩余速度/(m/s)	速度降落/(m/s)	无叶片弹重/kg	叶片断裂能耗/J	靶吸收的能量/J
1				8.660	208.8	
2	765	724	41	8.722	208.8	292180
3	625	571	54	8.726	208.8	307743
4				8.730	208.8	
5	720	672	48	8.685	208.8	320249
	672			8.685		
6	731	684	47	8.750	208.8	318758
	684	630	54	8.750		310433
7	690	641	49	8.716	208.8	313982
	641	585	56	8.716		299203
	585	520	65	8.716		313013

从表 1 的数据看出,在忽略弹体变形吸收能量的前提下,与结构靶板相比,均质靶消耗的能量最小,结构靶比均质靶消耗的能量大 2.4%~9.1%,平均大 5.75%。且结构靶板消耗的能量与弹体速度的降落幅度之间没有明显的规律,这说明加强筋对靶板吸收能量的大小起重要作用,且作用机理复杂。

3.2 尾翼及多层靶的作用分析

(1)弹体的尾翼对弹体的剩余速度以及靶板的能量吸收没有明显影响,这是因为即使尾翼断裂时所吸收的总能量按最大值计算,因尾翼断裂导致的弹体剩余速度的损失,经过推倒计算(尾翼断裂吸收的总能量以及叶片弹体的质量均为已知),最多为 4mm/s,可以忽略;而尾翼所具有的初始动能除了其自身断裂消耗掉一部分能量外,其余的能量均消耗到尾翼撞击靶板时对靶板的切割作用上,因而在计算能量和剩余速度时,弹体的质量均不包括叶片的质量。但因为靶板的裂纹及断裂方向几乎都沿着尾翼切割靶板的方向,因而尾翼对第 1 层靶板的破坏模式有较严重的干扰作用。

(2)在有尾翼叶片(第 1 层靶)和无尾翼叶片(第 2、3 层靶)的弹体过靶情况下,弹体速度的降落幅度随初速的增大而减小;在同样的初速和结构靶的条件下,有尾翼叶片的弹体速度的降落幅度比无尾翼叶片的弹体速度的降落幅度小,如图 3 所示。说明尾翼对弹体剩余速度的影响很小。和第 1 层靶板相比,第 2、3 层靶板的着速较低,随弹着速的降低,靶板的塑性变形区域增大,吸收弹体的能量也随之增加,因而随靶板层数的增加,速度降落的幅度也就随之增大。着速在(690~765)m/s 时,均质靶和第 1、2、3 层结构靶速度的降落值分别为 41、48、55、65m/s,靶板层数与速度降落幅度之间的关系为:第 1 层结构靶比均质靶速度降落的幅度高 17.1%,第 2 层结构靶比第 1 层结构靶的速度降落幅度高 14.5%,第 3 层结构靶又比第 2 层结构靶的速度降落幅度又提高 18.0%。因此,加筋结构靶比均质靶的抗侵彻能力明显提高;同时,随着靶板层数的增加,靶板系统的抗弹能力有显著增强。随着弹初速的降低和靶板材料塑性的增加,上述趋势会更加明显,这也正是多层靶在防护体系中的意义所在。因此,对于具有多层靶防护体系的毁伤,提高弹体的着靶速度有很重要的实际意义。通过对本次实验结果分析,若弹体着靶速度低于 600m/s 时,速度降落的幅度会有显著的增加。

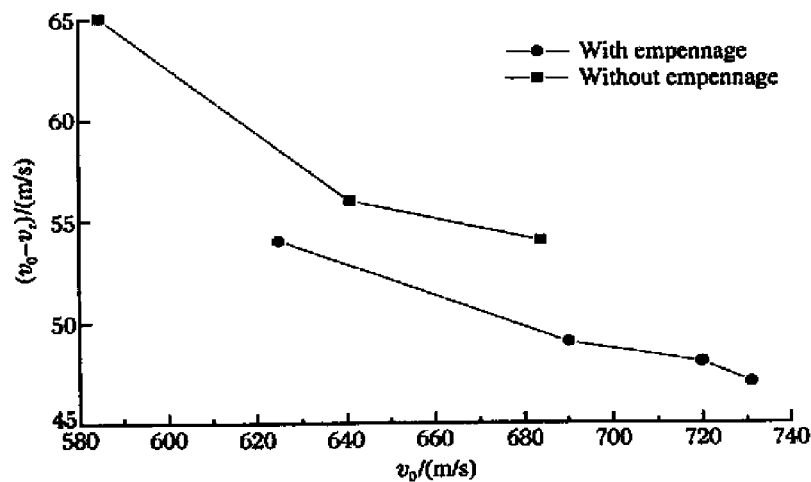


图 3 过有尾翼叶片和过无尾翼叶片弹丸速度降落随初速变化图

Fig.3 Curve of velocity drop vs. initial velocity of different layer

3.3 弹体剩余速度的理论分析与计算

根据实验现象和实验结果,假设:

- (1)弹体在侵彻过程中的变形很小;
- (2)靶板以绝热剪切冲塞形式破坏,且塞块与弹体的剩余速度相同。

以上两个假设基本符合德·马尔分析模型^[2]的前提条件。其模型的极限穿透速度

$$v_c = K d^{0.75} b^{0.7} / (m^{0.5} \cos \alpha) \quad (3)$$

式中: K 为复合穿甲系数,根据实验数据进行数值拟合, $K=66000$ 时,能更好地预测实验结果; d 为弹体直径; m 为弹体质量; α 为弹体着靶角; b 为靶板厚度,这里 **b** 不是常数,它与着靶位置和加强筋的情

况有关,理论计算是采用等效厚度,即把弹体侵彻到筋的质量按质量等效成弹体横截面方向上的厚度,然后与均质板的厚度叠加,再乘以一个板、筋耦合系数。

按能量原理,有

$$mv_0^2/2 = m(v_r^2 + v_c^2)/2 + m_s v_r^2/2 \tag{4}$$

这里假设弹体在极限速度时的动能刚好等于靶板被冲塞穿透所需的能量,认为塞块与弹体的直径相同,且忽略弹靶因非弹性碰撞而损失的能量。(4)式中 m_s 是塞块的质量,其表达式为

$$m_s = k(\pi/4)d^2 b \rho_t / \cos \alpha \tag{5}$$

式中: k 是系数,通常 $k=0.8$; ρ_t 是靶板的密度。则剩余速度的表达式为

$$v_r = \frac{\sqrt{v_0^2 - v_c^2}}{\sqrt{1 + \frac{k\pi d^2 b \rho_t}{4m \cos \alpha}}} \tag{6}$$

理论计算结果和实验结果的对比见表 2。从表中结果可以看出,考虑了加强筋对弹体侵彻厚度和刚度两个方面的影响,然后按等效厚度进行计算是合理的,因而理论计算结果与实验结果吻合良好。

表 2 实验结果、理论计算结果和数值模拟结果的比较

Table 2 Comparison of calculated, experimental and theoretical results

实验值		理论值		相对误差/(%)	计算值	相对误差/(%)
v_0 /(m/s)	v_r /(m/s)	v_c /(m/s)	v_r /(m/s)		v_r /(m/s)	
585	520	208.6	525.3	-1.02	534.0	-2.60
625	571	209.1	575.5	0.79	584.0	-2.30
641	585	208.2	582.6	0.41	594.0	-1.50
684	630	210.9	626.2	0.60	632.0	-0.30
690	641	208.6	632.2	1.40	642.0	-1.50
720	672	211.2	675.1	-0.46	675.0	-0.45
731	684	211.3	673.5	1.53	680.0	0.60
765	724	209.2	707.6	2.27	725.4	-0.20

3.4 数值模拟与实验结果和理论计算结果的比较

利用 LS-DYNA3D 计算程序对实验进行数值计算。初始建模时仅建带一根横筋和一根纵筋的模型,通过拷贝建立完整计算模型,从而减少建模复杂度。另外,在网格划分时,也有利于在弹、靶作用处加密网格,其它部分采用粗网格,既保证计算精度,又能在一定程度上减少计算时间,充分利用计算资源。图 4 为弹、靶的有限元网格划分情况。

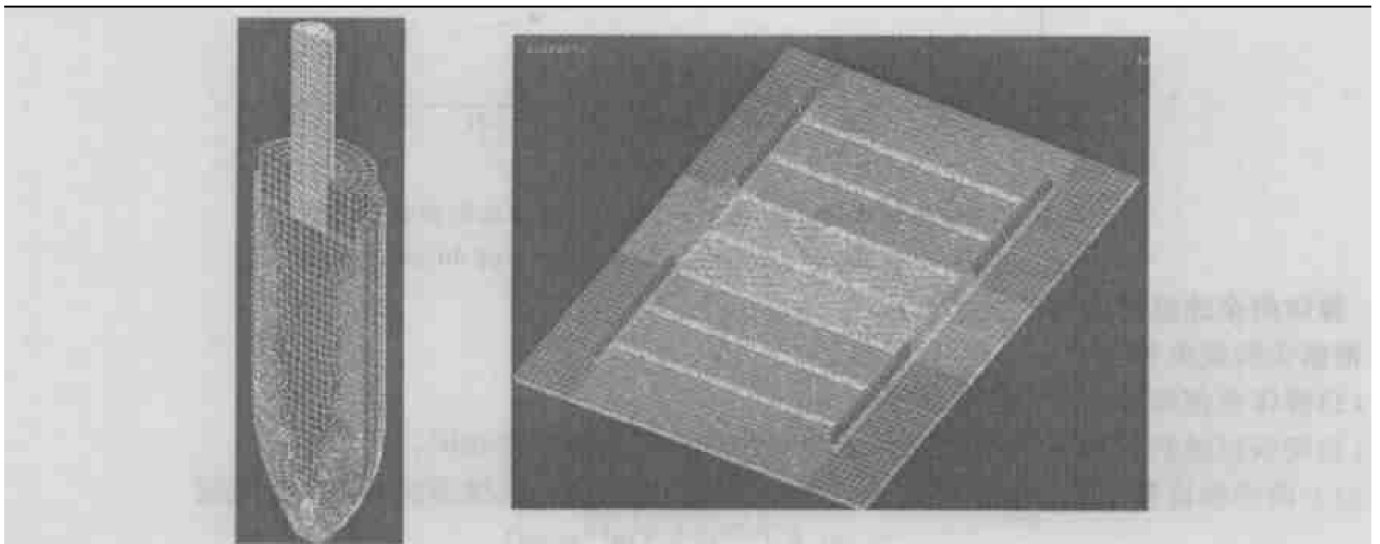


图 4 计算用有限元模型

Fig.4 Finite element model

计算采用塑性动态硬化模型, 应变率用 Cowper-Symonds 模型来考虑, 屈服应力与应变率关系为

$$\sigma = [1 + (\dot{\epsilon} / C)^{1/p}] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{\text{eff}}) \quad (7)$$

式中: σ 是计算应力; $\dot{\epsilon}$ 、 ϵ_p^{eff} 分别为应变率和失效应变; σ_0 为材料的静态屈服应力; C 、 p 为 Cowper-Symonds 应变率参量, 表征材料率敏感特征; E_p 为材料的塑性硬化模量; β 为系数。

填充物和尾翼作为弹性体处理, 只考虑其配重作用。计算用材料参数如表 3 所示。

表 3 计算所用材料参数

Table 3 Parameters of materials

材料	密度/(g/cm ³)	杨氏模量/GPa	泊松比	动态屈服极限/GPa	失效应变
弹体	7.85	210.8	0.28	1.35	2.0
靶板	7.80	205.8	0.30	1.00	0.8

从表 2 中的结果看, 弹体的初速越高, 计算结果与实验结果越接近, 初速越低, 相对误差则增大, 但最大相对误差是 -2.6%, 说明数值计算结果与实验结果比较一致。其结果的一致性归因于以下三方面: (1) 计算模型中, 每发弹的侵彻点与实验情况一致; (2) 数值计算所采用的模型和选用的材料参数合理; (3) 靶的塑性较差、弹体的着速比较高, 靶孔的变形范围较小。

3.5 加强筋对靶板破坏形式的影响

从弹体对靶板的毁伤情况看, 几乎所有弹孔的形状和尺寸都受加强筋的影响: 沿加强筋方向的弹孔尺寸明显比垂直加强筋方向上的尺寸小, 因而弹孔大都呈现椭圆形状。

有尾翼作用时的靶板破坏情况如图 5 所示, 加强筋对靶板的破坏形式有明显影响, 左边的均质靶板是在 $v_0=618\text{m/s}$ 时的破坏情况, 而右边结构靶 $v_0=625\text{m/s}$, 由于结构靶因加强筋的作用, 其破坏程度明显减轻, 即无断裂, 也无更严重的崩裂, 在一定程度上抑制了边侧反射波的作用。

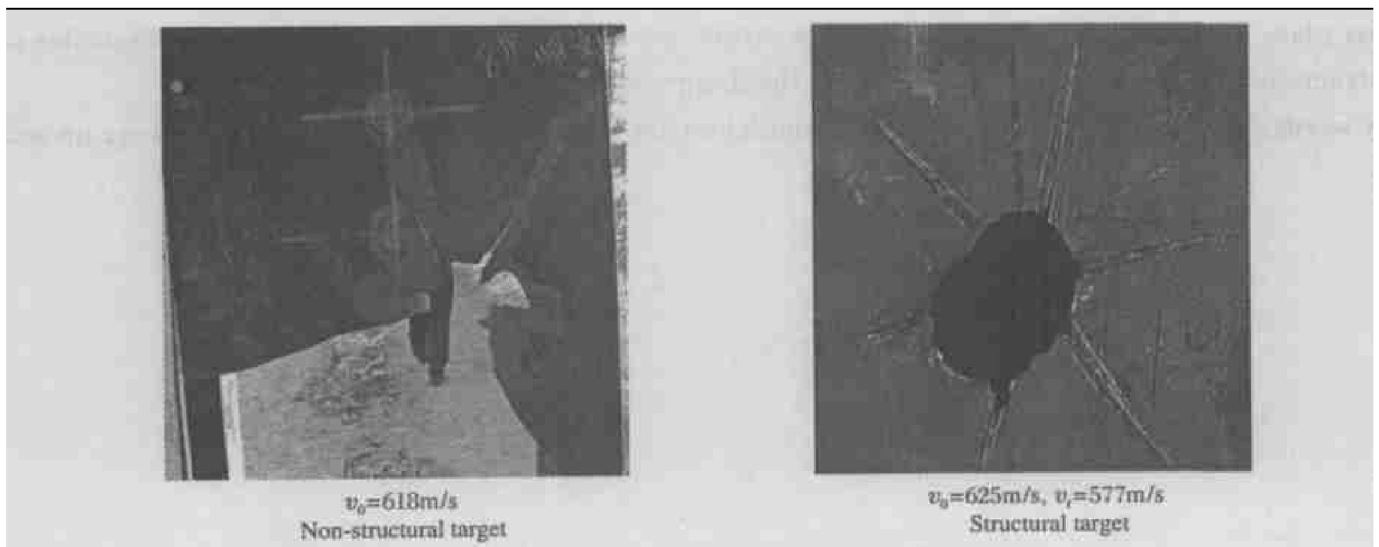


图 5 均质靶和结构靶的毁伤情况

Fig.5 Damage of non-structural target and structural target

4 结 论

(1) 加强筋对靶板吸收能量的大小起重要作用, 且作用机理复杂。在其他情况相近的情况下, 结构靶比均质靶吸收的能量平均大 5.75%;

(2) 随着结构靶板层数的增加, 弹体速度降落的幅度也增加: 第 2 层比第 1 底层增加 14.5%, 第 3 层比第 2 底层增加 18.0%。因此, 增加结构靶板的层数对结构的防护意义重大。

(3) 根据实验测得的数据, 复合穿甲系数取 66000 时, 理论计算结果和实验结果吻合较好。

(4) 对于塑性较差的靶板, 筋与靶的耦合效应对弹体弹道参数的影响比筋使靶厚度的增加对弹道参数的影响大。

(5)加强筋对靶板的变形和破坏形式起重要作用,对靶孔的尺寸和形状也有明显影响。

参考文献:

- [1] 叶本治,戴君全,杨桂红.超音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 studies on the structure of a supersonic semi-armor-piercing warhead[J]. Explosion and Shock Waves, 1993, 13(2):160—171.
- [2] 赵国志.穿甲工程力学[M].北京:兵器工业出版社,1992:51—54.

The experimental research for projectile penetrating the structural target with rebar

ZHANG Zhong-guo^{*}, HUANG Feng-lei, DUAN Zhuo-ping,
SONG Wei-dong, NING Jian-guo

(National Key Lab for the Prevention and Control of Explosion Disaster,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: According to the structure of warships, the structural target with rebar is designed, and the multi-layered space structural target with rebar penetrated by charged projectile is investigated experimentally. Based on the experimental results, the residual velocity formula is built up and the modes of destruction of the target is discussed. For the plasticity-less metal material target, the rigidity of the rebar plays a very important role in both the structural energy absorption by target and the modes of destruction. This paper could be helpful in the design of the protecting structures.

Key words: solid mechanics; penetration; simulation experiment; structural target with rebar; projectile

* Corresponding author: ZHANG Zhong-guo
E-mail address: zzg0718@bit.edu.cn
Telephone: 010-68914087-13