

文章编号: 1006-9941(2007)06-0561-05

弹丸对加筋板穿甲的数值模拟研究

杨世全¹, 唐平¹, 湛勇²

(1. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621900;

2. 上海交通大学振动冲击噪声国家重点实验室, 上海 200040)

摘要: 根据舰船上加筋板壳结构在强冲击载荷作用下的变形以及破坏过程, 结合加筋板受弹丸穿甲的实验研究, 采用数值模拟方式, 对加筋板受到弹丸攻击时, 靶板破坏模式、弹丸过靶姿态以及靶板抗穿透能力等进行了研究。结果表明, 筋板的存在, 使得靶板强度和刚度都得到了较大提高, 靶板整体结构性能以及破坏模式发生了较大变化, “一”“T”“十”字加筋使弹丸极限穿靶速度的提高量随筋板和弹丸的不同在 35% ~ 80% 之间变化, 弹丸的最大偏转角达到了 35° ~ 40°。

关键词: 爆炸力学; 弹丸; 加筋板; 冲击载荷; 穿甲; 数值模拟

中图分类号: TJ4; O389

文献标识码: A

1 引言

加筋板结构由于较轻且强度较高, 在军、民用工程、特别是船舶工业中得到了广泛的应用。近几十年来, 国内外学者对加筋板结构在爆炸载荷作用下的动力响应问题进行了大量的研究^[1-8]。对加筋板结构在穿甲作用下的动力响应及破坏过程, 一般采用均质等效靶板的方式进行研究^[9], 由于该方式不能很好地反应不同加筋形式对弹丸穿靶性能的影响, 张中国、宋卫东等^[10-11]分别采用试验和数值模拟的方式对弹丸贯穿单一加筋形式结构板进行了研究, 分析了加筋对靶板破坏模式和弹道参数的影响, 并对靶板吸收能量进行了分析。湛勇^[12]结合舰船甲板受战斗部攻击的情形, 考虑到弹丸着靶点同加筋的相对位置就不同加筋形式对弹丸穿靶性能影响进行了实验研究, 但由于测试手段的限制, 难以了解弹丸穿甲过程中相关物理量的变化过程。

针对上述问题, 本课组结合文献^[12]的实验, 采用数值模拟的方式, 针对两种头形弹丸对不同形式加筋板的穿甲进行了系统研究, 分析了弹丸其穿甲过程中相关物理量的变化。研究思路主要是对实验中^[12]的截卵弹丸正穿“一”字单加筋板的试验结果进行数值模拟, 以获取相应的弹靶物理模型以及焊缝处理方式, 然后在此基础上展开截卵和球头弹丸对不同加筋形式靶板穿甲的数值模拟研究。

在数值模拟中, 为了简化, 只考虑弹丸正穿靶板中心的情况, 对于“一”字和“T”字加筋来说, 弹丸着靶点对应在筋板中心, 对于“十”字加筋来说, 其着靶点对应在筋板的交叉点上, 而对于“#”字加筋来说, 弹丸着靶点对应在“#”字加筋的中心。

2 有限元模型的建立

2.1 焊缝处理方式

实验所用靶板包含无筋靶板和各种加筋形式的加筋板, 靶板同筋板连接方式为焊接。试验后除少数焊料没有充分填充的地方外, 绝大多数焊缝都没有出现撕裂情况, 在建模时忽略了焊缝的影响, 将靶板与筋板采用固连的方式作为一个整体来进行处理。

2.2 弹靶模型

在弹靶模型上, 本工作关心的是弹丸穿靶过程中靶板的破坏以及不同形式筋板对弹丸穿靶的影响, 且弹丸(D6A)的强度和刚度都远高于靶板(16MnR)的强度和刚度, 弹丸穿靶后并未出现明显变形, 因此在建模时取弹丸模型为刚性材料模型。而对于靶材, 依据文献^[13]的分析, 采用了弹塑性硬化模型^[14], 模型所用参数如表 1 所示。

在弹靶模型几何尺度上, 主要参照实验中弹丸和靶板尺度进行建模。实验弹丸尺寸为 $\Phi 25.3 \text{ mm} \times 50.6 \text{ mm}$, 靶板尺寸为 $570 \text{ mm} \times 530 \text{ mm}$, 筋板的尺寸如图 1 所示。在模型网格尺度上兼顾模型规模和求解精度, 网格尺寸大小为 2 mm, 在靶板厚度方向划分了 3 层单元。图 2 为数值模拟结果与试验结果的对比。

收稿日期: 2007-03-06; 修回日期: 2007-05-20

基金项目: NSAF 联合基金项目资助(10276040)

作者简介: 杨世全(1973-), 男, 工程师, 硕士研究生, 从事常规战斗部设计技术研究。

表 1 16MnR 动态强化模型参数

Table 1 Dynamic hardening model parameters for 16MnR

density /kg · m ⁻³	elasticity module /GPa	yield stress /MPa	Poisson's ratio	harden module /GPa	harden coefficient	strain rate constant	
						C	P
7800	210	425	0.27	2	0.25	40	5

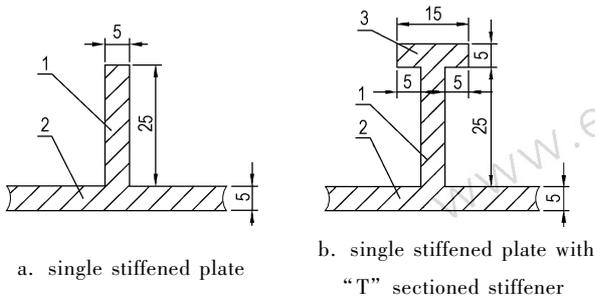


图 1 筋板尺寸示意图

1—筋板, 2—靶板, 3—腹板

Fig. 1 Schematic of dimension of stiffener

1—stiffener, 2—target plate, 3—web plate

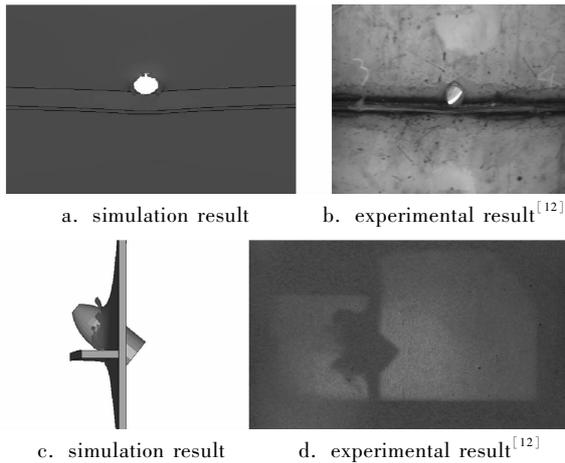


图 2 数值模拟与实验结果的对比

Fig. 2 Comparison of simulations and experimental results

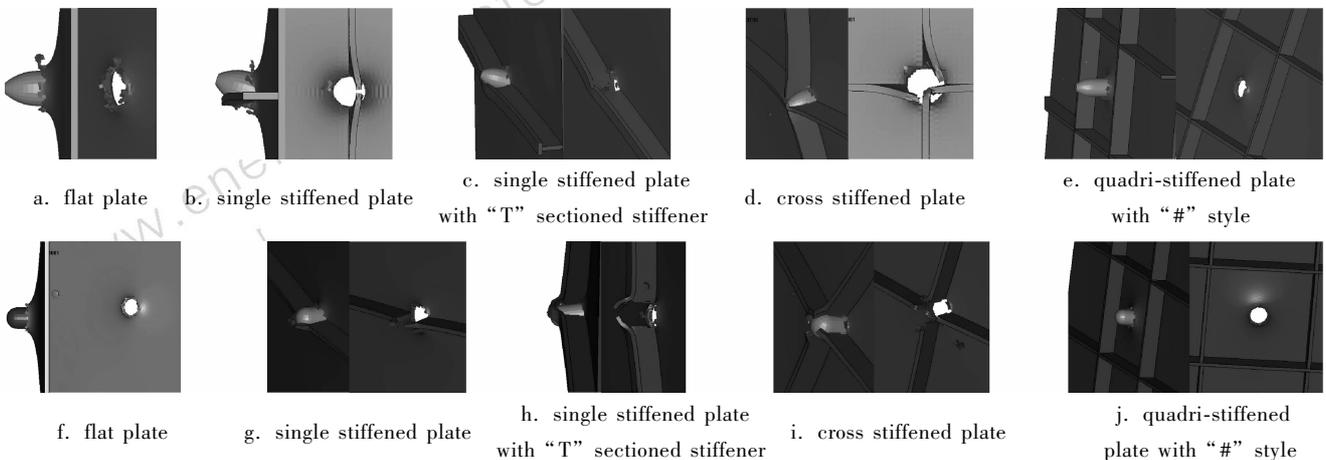


图 3 弹丸穿靶图像

Fig. 3 Images of projectile impacting target

3 数值模拟结果及分析

3.1 靶板破坏模式分析

图 3 为两种头形弹丸正穿不同加筋形式靶板的典型穿靶图像。图中 a~e 为截卵弹丸穿靶图像, f~j 为球头弹丸穿靶图像。由图 3 可以看出, 靶板破坏模式不仅与弹丸头形有关, 而且还在很大程度上受靶板加筋形式的影响, 具体分析如下。

对无筋靶板来说, 截卵弹丸以接近极限穿靶速度穿靶时, 靶板发生了较大的结构响应, 穿靶后靶板呈现出花瓣状的破坏形式, 靶孔出现了较大翻边, 如图 3a 所示。球头弹丸在穿靶过程中靶板的响应以及破坏模式与截卵弹丸类似, 只是球头弹丸的头形更趋于钝头弹丸, 靶板的结构响应更为明显, 其破坏模式更接近于冲塞破坏, 弹丸穿靶后产生了一塞块, 靶板的破口也较为整齐, 如图 3f 所示。

对“一”字加筋靶板来说, 加筋的存在, 使得靶板变形和破坏模式相对无筋靶板都有一定的差异。截卵弹丸穿靶后, 筋板被打断, 弹丸姿态发生变化, 筋板被挤向一边, 靶板出现了一定的翻边, 但不如无筋靶板明显, 如图 3b 所示。对于球头弹丸, 其具有较好的穿靶稳定性, 穿靶后筋板直接被打断, 并未出现筋板被挤向一边的现象, 如图 3g 所示。

对“T”字加筋靶板来说, 靶板变形相对无筋靶板局限在较小的范围内。弹丸穿靶后, 靶板的翻边进一步减小, 弹丸对靶板的破坏主要表现为挤凿破坏。由于腹板的存在, 筋板侧向刚度得到加强, 截卵弹丸穿靶后, 筋板虽被挤向一边, 但不如一字加筋明显, 由于受到弹丸挤凿以及穿靶过程中弹丸姿态的偏转, 弹丸穿靶后腹板发生弯曲, 但并未断裂, 只是在其上边缘出现

由于挤凿而导致的局部损伤,如图3c所示。对于球头弹丸,由于其穿靶稳定性较好,弹丸穿靶过程中筋板被逐渐打断,腹板也由于受到弹丸挤凿而逐渐向外鼓出并最终断裂,如图3h所示。

对“十”字加筋靶板来说,由于弹丸着靶点位于“十”字加筋的筋板交叉点上,加筋的存在使得弹丸在穿靶过程中受到一种近似于对称的挤压约束。对于截卵弹丸,其头部截头半径较小,弹丸在穿靶过程中筋板出现不对称失效,筋板失效后,两块筋板分别偏向一边,如图3d所示。对于球头弹丸,由于其具有较好的穿靶稳定性,弹丸穿靶后筋板都被打断,且呈对称形式破坏,如图3i所示。

对“#”字加筋靶板来说,其破坏模式与弹丸正穿无筋靶板类似,只是由于“#”字加筋的存在,在一定程度上增加了靶板刚度,穿靶后靶板整体变形略小于无筋靶板,弹丸穿靶后,相应的四块筋板在靶体中心部位都出现向外鼓的变形,如图3e和图3j所示。

3.2 弹丸过靶姿态分析

图4和图5分别为截卵和球头弹丸正穿不同加筋形式靶板过程中的弹丸姿态变化曲线。由图4和图5可看出,弹丸过靶姿态同样不仅与弹丸头形有关,而且在很大程度上受靶板加筋形式的影响,具体分析如下。

对无筋靶板和“#”字加筋靶板来说,由于弹丸直接作用在靶板上,其穿靶过程中保持了较好的穿靶姿态,只是在极限穿靶速度附近由于靶板结构响应导致弹丸穿靶姿态有一定的变化,变化幅度为 $3^{\circ} \sim 4^{\circ}$,如图4a、图4e和图5a、图5e所示。

对“一”字加筋靶板来说,加筋的存在,使得弹丸在穿透靶板接触到筋板时,弹丸姿态发生了较大的变化。对于截卵弹丸,其在穿靶过程中当偏转角度接近 20° 时,其偏转角度随速度不同而发生了较大的变化,即出现了所谓的“分叉”现象。当速度低于极限穿靶速度时,弹丸偏转角度随时间的推移而减小。当速度接近极限穿靶速度时,弹丸偏转角度基本上稳定在 20° 左右。当速度高于极限穿靶速度时,弹丸穿透靶板,穿靶后的偏转角度进一步增大,如图4b所示。

对球头弹丸,当其速度接近极限穿靶速度时,弹丸最大偏转角度在 9° 左右。当弹丸速度略高于极限穿靶速度时,弹丸穿透靶板,穿靶后的姿态受筋板影响明显,穿靶后弹丸偏转角度进一步增大。当弹丸速度进一步提高,穿靶后的姿态受筋板影响较小,弹丸表现出了较好的穿靶稳定性,穿靶后的偏转角度在 $3^{\circ} \sim 4^{\circ}$,如图5b所示。

对“T”字加筋靶板来说,筋板以及腹板的存在,使得弹丸在穿靶过程中的姿态发生了较大变化。其中截

卵弹丸的偏转角度随穿靶速度不同有较大的差异。当速度低于极限穿靶速度时,其偏转角度达到 15° 左右时便随时间的推移而减小。当弹丸速度接近极限穿靶速度时,其偏转角度基本上稳定在 20° 左右。当弹丸速度高于极限穿靶速度时,弹丸穿透靶板,在腹板的作用下,弹丸穿靶后的偏转角度进一步明显增大,其偏转角度在 $35^{\circ} \sim 40^{\circ}$,如图4c所示。

对球头弹丸,其在穿靶初期的姿态变化同一字加筋类似,在穿靶后期,受“T”字加筋的腹板作用,弹丸姿态变化随速度不同有较大的变化。当速度低于极限穿靶速度时,弹丸在穿靶过程中有一最大偏转角。当弹丸以极限速度穿靶时,其在穿靶过程中达到的最大偏转角度接近 15° ,当达到最大偏转角时,弹丸发生回弹,其偏转角度随时间的推移而减小。当弹丸速度高于极限穿靶速度时,在腹板的作用下,其偏转角度随时间的延长而不断增大,如图5c所示。

对“十”字加筋靶板来说,同前面的分析一样,弹丸在穿靶过程中受到一种近似于对称的挤压约束,其穿靶过程中的姿态并未发生太大变化。对于截卵弹丸,其头部截头半径较小,穿靶过程中筋板出现不对称失效,过靶后,弹丸姿态出现了一定的偏转,但其偏转角度都还是明显小于“一”字和“T”字加筋情况,其偏转角度在 $16^{\circ} \sim 18^{\circ}$,如图4d所示。对于球头弹丸,由于其具有较好的穿靶稳定性,穿靶过程中,弹丸姿态并未发生多大变化,最大偏转角度在 $2^{\circ} \sim 3^{\circ}$,如图5d所示。

3.3 靶板抗穿透能力分析

表2列出了不同加筋形式下,两种弹丸的极限穿靶速度。由表2可以看出,加筋的存在,使得靶板整体抗穿透能力得到了较大提高,但不同加筋形式的靶板对不同头形弹丸抗穿透能力的影响有着较大差异。

对于几种加筋形式来说,由“一”字加筋,“T”字加筋到“十”字加筋,相对无筋靶板,靶板对两种头形弹丸的抗穿透能力都有了较大提高。截卵弹丸极限穿靶速度的提高量分别为44%、52%和78%左右;球头弹丸相应提高量分别在38.7%、61.7%和75.5%左右。

对“#”字加筋来说,加筋的存在,一定程度上强化了靶板边界条件,加强了靶板刚度,这样使得弹丸在穿靶过程中靶板结构响应得到了一定的减弱,以致对弹丸的抗穿透能力略低。

结果表明,相对于无筋靶板来说,“一”字加筋使得靶板对两种弹丸抗穿透能力的影响没有显著差异,两种弹丸极限穿靶速度提高量都为40%左右。而在由“一”字加筋变化到“T”字加筋以及由“T”字加筋变

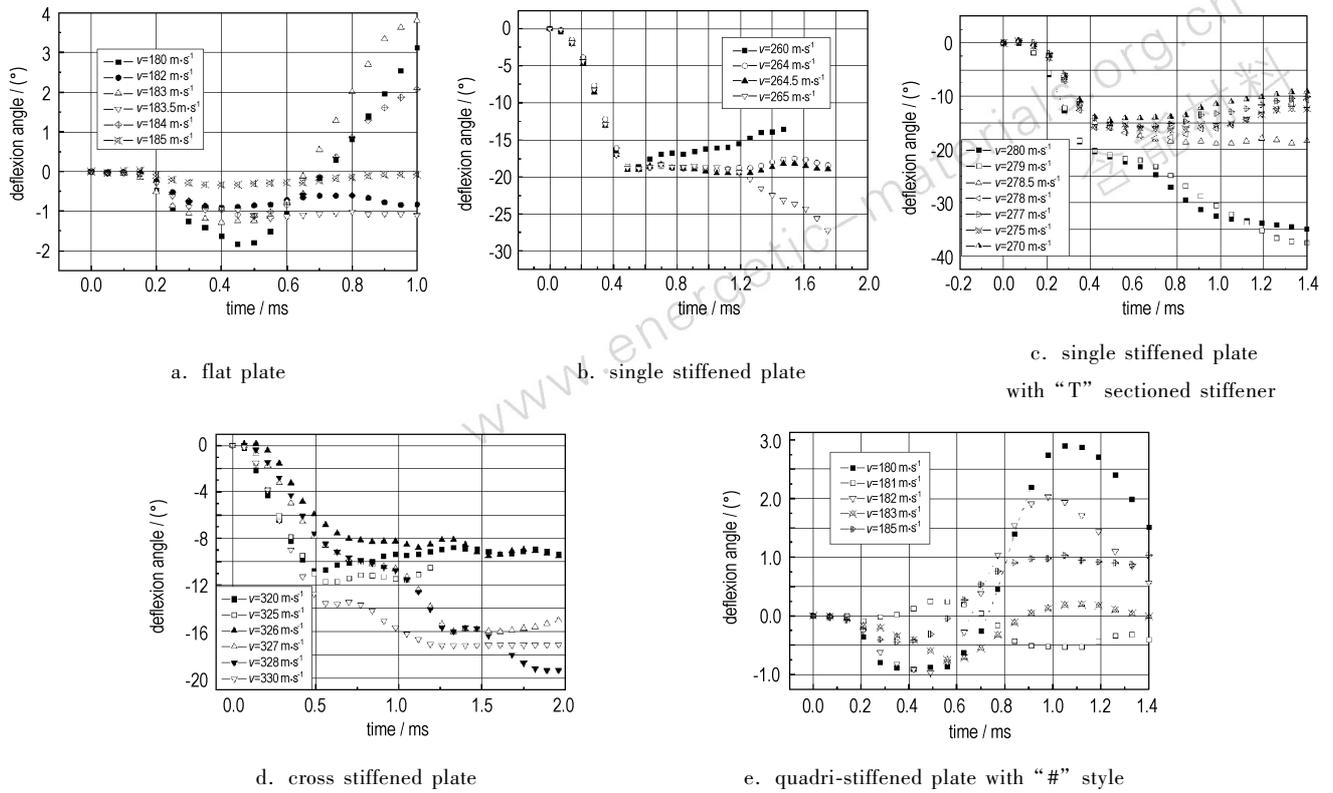


图4 截卵弹丸穿靶过程中的姿态变化曲线

Fig. 4 The posture curves of truncated ogive nose projectile during impacting target

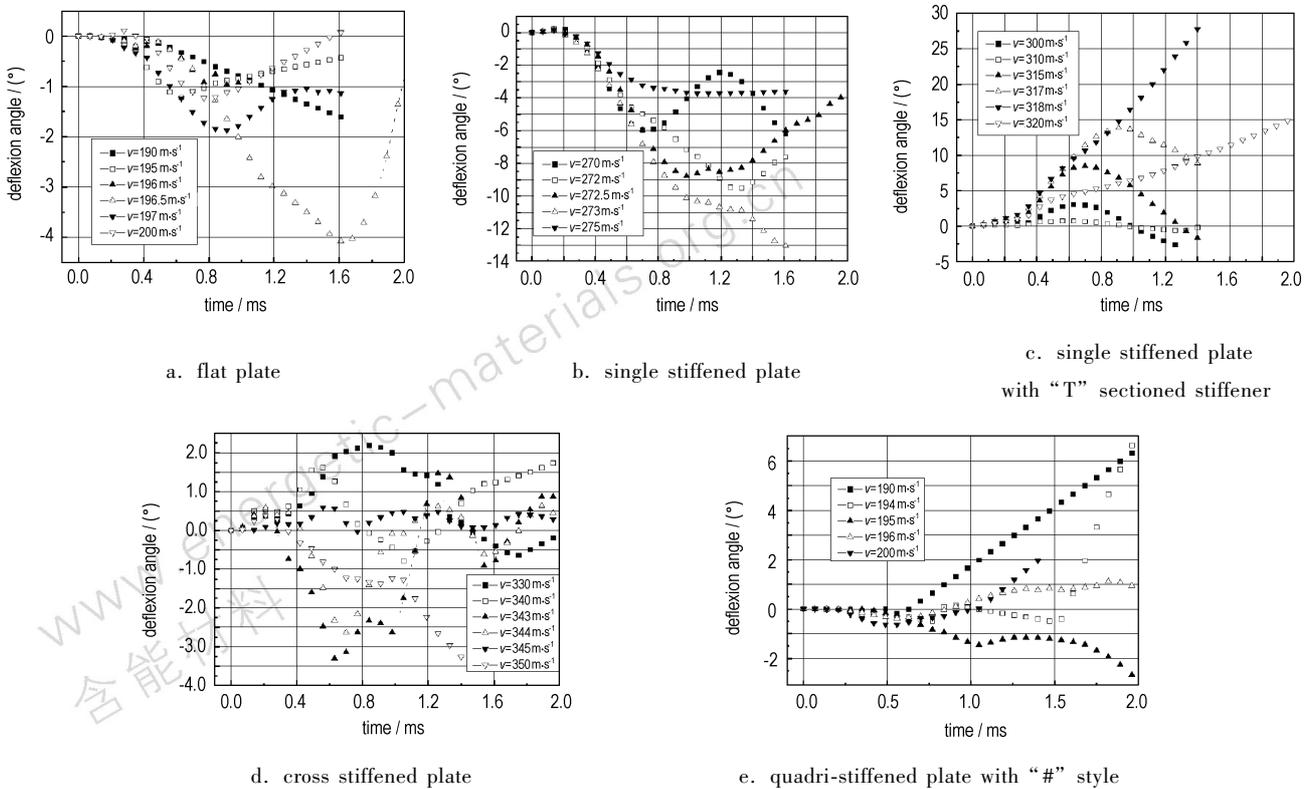


图5 球头弹丸穿靶过程中的姿态变化曲线

Fig. 5 The posture curves of spherical nose projectile during impacting target

表 2 不同加筋形式下弹丸极限穿靶速度

Table 2 Limit velocity of projectile impacting target

		with different reinforced ribs				$m \cdot s^{-1}$
stiffener style	none	single stiffener	"T" sectioned stiffener	cross stiffener	quadri-stiffener with "#" style	
truncated ogive nose projectile	183 ~ 184	264 ~ 265	278 ~ 279	326 ~ 327	181	
spherical nose projectile	196 ~ 197	272 ~ 273	317 ~ 318	344 ~ 345	195	

化到“十”字加筋时,加筋形式的变化使得靶板对两种头形弹丸抗穿透能力的影响出现了较大差异,其原因在于两种弹丸穿靶稳定性上的差异,具体分析如下。

在由“一”字加筋变化到“T”字加筋时,对截卵弹丸来说,其在穿靶过程中过早发生姿态偏转,以致最后“T”字加筋的腹板对弹丸穿靶的阻碍作用不是太明显;对于球头弹丸来说,其穿靶稳定性较好,在完全击断“T”字加筋的筋板后,进一步受到腹板的阻碍作用。因而在由“一”字加筋变化到“T”字加筋时,加筋形式的变化使得靶板对球头弹丸的抗穿透能力影响较大。

在由“T”字加筋变化到“十”字加筋时,筋板对两种弹丸穿靶的影响类似于施加了一种近似对称的挤压约束,故两种弹丸都具有相对较好的穿靶稳定性。只是对截卵弹丸来说,其相对穿“T”字加筋板时,姿态变化较大,而对球头弹丸来说,其相对穿“T”字加筋板时的姿态变化较小。因而在由“T”字加筋变化到“十”字加筋时,加筋形式的变化使得靶板对截卵弹丸抗穿透能力的影响较大,而对球头弹丸的相应影响相对较小。

4 结 论

由以上比较和分析可以看出,筋板的存在,使得靶板强度和刚度都得到了提高,靶板整体结构性能以及破坏模式得到了较大改变。

筋板对弹丸穿甲起着较大的阻碍作用,一方面,它提高了靶板结构对弹丸的抗穿透能力,相对无筋靶板,“一”字加筋、“T”字加筋或“十”字加筋的存在使得弹丸极限穿靶速度提高量随筋板和弹丸的不同在 35%~80% 之间变化;另一方面,它很大程度上改变了弹丸运动轨迹,对于本研究情况,弹丸最大偏转角度达到了 35°~40°(见图 4c)。从而可以预见,筋板的存在较大地削弱了弹丸穿过第一层靶后对第二层靶的穿甲能力,这种作用对尖头弹丸的影响尤为明显。

与尖头弹丸相比,虽然钝头弹丸穿甲能力相对较弱,但它却有较好的穿甲稳定性,穿过第一层靶后能保持较好的姿态,在穿第二层靶时相比尖头弹丸有一定优势。

参考文献:

- [1] 江松清,李永池,陈振翔,等. 横向冲击载荷作用下加筋板的非线性动力响应[J]. 中国科技大学学报 2000,30(4): 406-413.
JIANG Song-qing, LI Yong-chi, CHEN Zhen-xiang, et al. Nonlinear dynamic response of stiffened plates under lateral impact loading[J]. *Journal of China University of Science and Technology*, 2000, 30(4): 406-413.
- [2] 黄振球. 固支加筋方板的大挠度塑性动力学响应[J]. 固体力学学报, 1995, 16(1): 7-12.
HUANG Zhen-qiu. Large deflection dynamic plastic response of clamped square plates with stiffeners[J]. *Acta Mechanica Solid Sinica*, 1995, 16(1): 7-12.
- [3] 刘士光,唐文勇. 加筋板结构在冲击载荷作用下的塑性动力学响应[J]. 华中理工大学学报, 1996, 24(1): 106-109.
LIU Tu-guang, TANG Wen-yong. The dynamic plastic response of a structure with stiffened plates under impulsive loading[J]. *Huazhong Univ. of Sci. & Tech*, 1996, 24(1): 106-109.
- [4] 吴有生,彭兴宁,赵本立. 爆炸载荷作用下舰船板架的变形与破坏[J]. 中国造船, 1995, (4): 55-61.
WU You-sheng, PENG Xing-ning, ZHAO Ben-li. Plastic deformation and damage of naval panels subjected to explosion loading[J]. *Shipbuilding of China*, 1995, (4): 55-61.
- [5] 朱锡,刘燕红,张振中,等. 非接触爆炸载荷作用下舰船板架的塑性动力响应[J]. 武汉造船, 1998, (6): 1-3.
- [6] O K Bedair. Stability, free vibration and bending behavior of multi-stiffened plates[J]. *J Eng Mech*, 1997, 123(4): 328-337.
- [7] Youguang Pan, Luke A Louca. Experimental and numerical studies on the response of stiffened plates subjected to gas explosions[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 1999(52): 171-193.
- [8] Y W Kwon, R E Cunningham. Comparison of USA-DYNA finite element models for a stiffened shell subject to underwater shock[J]. *Computers & Structures*, 1998, 66(1): 127-144.
- [9] 金建明,唐平. 舰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. An investigation on equivalence relation between the side structure of vessels and even target plates[J]. *Journal of Ballistics*, 2000, 12(1): 83-87.
- [10] 张中国,黄风雷,段卓平,等. 弹体侵彻带加筋结构靶的试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(5): 431-436.
HANG Zhong-guo, HUANG Feng-lei, DUAN Zhuo-ping, et al. The experimental research for projectile penetrating the structural target with rebar[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2004, 24(5): 431-436.
- [11] 宋卫东,王静,宁建国. 截卵形弹体贯穿加筋靶板的数值模拟研究[C]// 计算爆炸力学进展, 中国青岛, 200608: 233-239.
- [12] 湛勇. 加筋板结构受高速弹丸碰撞时的实验研究[R]. NSAF 联合基金 2005 年度报告. 200510.
- [13] 湛勇. 加筋板结构受高速弹丸碰撞时的数值分析[R]. NSAF 联合基金 2005 年度报告. 200510.
- [14] LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL[CP]. March 2003 Version 970.

(下转 569 页)

综上所述,毁伤增强型破片对目标的毁伤除了动能打击之外,还有爆炸、冲击超压和高温作用等复合毁伤,而且后者决定其最终毁伤效果,这是因为毁伤增强型破片的化学潜能(据表1计算得26444 J)约为其平均动能(表2)的12.4倍。

4 结 论

以铝/氟聚合物复合材料制备的毁伤增强型破片比相同尺寸的惰性钢破片具有更大的毁伤性,除了对目标给予类似钢破片的穿甲打击之外,毁伤增强型破片对目标还同时具有猛烈的爆炸作用、高温作用、纵火等复合毁伤。毁伤增强型破片的化学潜能约为其平均动能的12.4倍。

参考文献:

- [1] Taylor P A. Al/PTFE reactive material (RM-4) sandia effort: Experiments & Modeling[R]. SAND2003-1840P.
- [2] Davis J J, Lindfors A J, Miller P J, et al. Detonation like phenomena in metal-polymer and metal/metal oxide-polymer mixtures[R]. US Naval Air Warfare Center.
- [3] Vasant S J, Waldorf M D. Process for making polytetrafluoroethylene - Aluminum composite and product made[P]. US 6547993 B1.
- [4] Daniel B Nielson, Benjamin N Ashcroft, Daniel W Doll. Reactive material enhanced munition compositions and projectiles containing same [P]. US 2005/0299323 A1.
- [5] Daniel B Nielson, Richard M Truitt, Nikki Rasmussen. Lower temperature, extrudable, high density reactive materials[P]. US 6962634.
- [6] Michael T R, Daniel W Doll, James R H, et al. Reactive material enhanced projectiles and related methods[P]. US 20060011086.

Preliminary Research on Damage Enhanced Fragment

HUANG Heng-jian¹, HUANG Hui¹, YANG Shi-qing²,
YANG Pan¹, ZHANG Tong², XI Yan¹, LU Xiao-jun¹

(1. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China; 2. National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Damage enhanced materials were used to improve damage efficiency of fragments antiaircraft weapons. A kind of damage enhanced fragments (DEF) containing Al/PTFE with dimension of $\Phi 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ was designed and prepared. Damage performance experiments show that damage enhance fragments attack targets not only by kinetic energy, but also by combined damages such as exploding, overpressure, high temperature, and setting fire etc. The results show that the designed damage enhance fragments have remarkably higher damage performances than steel fragments with the same dimensions, and its potential chemical energy is 12.4 times as high as its kinetic energy.

Key words: explosion mechanics; damage enhance; reactive material; fragment

(上接 565 页)

Numerical Investigation on Perforation of Projectile Impacting Stiffened Plate

YANG Shi-quan¹, TANG Ping¹, CHEN Yong²

(1. Institute of Systems Engineering, CAEP, Mianyang 621900, China;
2. State Key Laboratory of Vibration, Shock and Noise, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200040, China)

Abstract: Based on the experimental perforation of projectile impacting stiffened plate, numerical simulations were conducted to study the failure pattern of target, projectile trajectory and the anti-perforation capability of target. The results show that stiffeners enhance the strength and rigidity of target, and change the whole structure capability and the failure pattern of target. For the single stiffened plate, single stiffened plate with "T" sectioned stiffener and cross stiffened plate, the increase of limit penetration velocity for different stiffeners and projectiles is 35% ~ 80%. The maximum deflexion angle of projectile is 35° ~ 40°.

Key words: explosion mechanics; projectile; stiffened plate; impact load; perforation; numerical simulation