

文章编号: 1001-1455(2003)01-0061-06

舰用轻型复合装甲结构及其抗弹实验研究^{*}

朱 锡¹, 梅志远¹, 刘润泉¹, 查友其², 王晓侠²

(1. 海军工程大学船舶与海洋工程系, 湖北 武汉 430033; 2. 上海江南造船厂军代表室, 上海 200092)

摘要: 采用纤维增强复合材料(简称 FRC)板前置船体结构钢(简称 C 型钢)板模拟舰用轻型复合装甲结构, 对有间隙和无间隙复合装甲结构以及不同纤维增强复合材料防弹板进行了打靶实验研究, 实验测试了不同纤维增强复合材料防弹板以及有间隙和无间隙复合装甲结构抗弹丸穿甲的吸能量。结果表明: FRC 板较 C 型钢板有明显的抗弹优势; 弹丸速度和形状对 FRC 板的抗弹性能有较大影响; 基体种类和基体含量对 FRC 板的抗弹性能有一定影响; FRC 板与 C 型钢板之间间距的增大将有利于组合靶板综合抗弹能力的提高。

关键词: 爆炸力学; 纤维增强复合材料; 复合装甲; 穿甲实验; 舰船防护

中图分类号: O385 国标学科代码: 130°3530 文献标志码: A

1 引言

高分子纤维增强复合材料具有优良的物理机械性能和化学性能。作为防弹材料, 其具有较好的动能吸收性和无“二次杀伤效应”。因此, 目前世界上一些发达国家的海军舰艇上已大量使用 FRC 作为轻型复合装甲材料。由于抗弹机理的复杂性, 目前对其抗弹性能的研究侧重于实验研究, 以及实验基础上的半经验简化理论推导或数值分析^[1-6]。

本文中, 针对工程实际, 结合舰船结构, 实测了不同混杂纤维增强复合材料防弹板以及有间隙和无间隙复合装甲结构抗弹丸穿甲的吸能量, 并对实验结果进行了分析, 得出了有价值的结论。

2 实验设计

2.1 舰用轻型复合装甲结构

舰用轻型复合装甲结构将结合舰船结构进行设计, 如图 1 所示。其中 C 型钢板为船体外板、舱壁等; 间距隔离构件为船体肋骨、扶强材等。隔离构件取出, 钢板将与 FRC 靶板紧密贴合。

2.2 FRC 靶板制作与组成参数

本文中, 针对不同种类的 FRC 靶板进行了大量的实验。实验用 FRC 靶板采用胶膜法或涂胶法将纤维编织物叠铺, 然后通过平板压机加热、加压固化而成。FRC 靶板组成参数见表 1。靶板长 400mm, 宽 400mm。

2.3 实验测试方法

打靶实验在海军工程大学结构与强度实验室进行, 采用计时器测速法, 实验装置如图 2 所示。 h 为组合靶板间距, 实验用示波器为日立 VC7104 可存储瞬态数字示波器, 弹丸为五六式 7.62mm 步枪普通钢芯尖头弹。弹丸侵彻速度为 $v_i = d_i / t_i$, $i = 1, 2$, d_i 、 t_i 分别为弹丸穿透触发前、后两组测速屏的间隔距离和间隔时间。

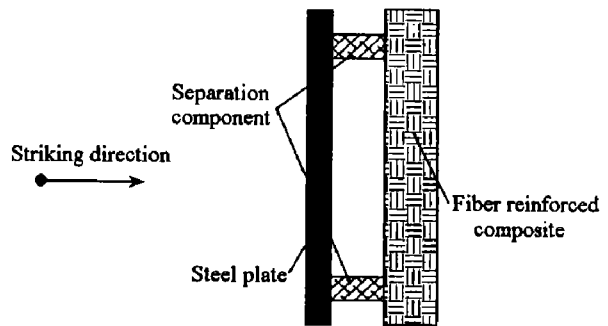


图 1 舰用轻型复合装甲结构

Fig. 1 Scheme of warship's light composite armor

* 收稿日期: 2002-01-29; 修回日期: 2002-04-19

作者简介: 朱 锡(1961—), 男, 教授, 博士生导师。

表 1 FRC 靶板组成参数

Table 1 Constituted parameters used for fiber reinforced composite target

靶板 编号	纤维 材料	基体 材料	含胶量/ %	面密度/ (kg/m ²)	靶板 编号	纤维 材料	基体 材料	含胶量/ %	面密度/ (kg/m ²)
1 [#]	S-2	聚碳酸酯	26.15	20.30	9 [#]	S-2/T750	聚碳酸酯		19.70
2 [#]	S-2	聚碳酸酯	17.00	19.80	10 [#]	S-2/T750	聚碳酸酯		18.80
3 [#]	S-2	改性酚醛	30.00	23.30	11 [#]	S-2/T750	聚碳酸酯		19.80
4 [#]	T700	改性酚醛	34.50	13.60	12 [#]	S-2/芳纶 1680	改性酚醛环氧	30.00	22.60
5 [#]	T700	环氧树脂	21.00	19.20	13 [#]	S-2/芳纶 1680	改性酚醛环氧	30.00	21.90
6 [#]	Dyneema	聚胺脂	20.00	18.70	14 [#]	S-2/Dyneema	乙烯基脂树脂		20.96
7 [#]	S-2/T700	乙烯基酯树脂	27.00	21.00	15 [#]	S-2/T750	聚碳酸酯		20.47
8 [#]	S-2/T750	聚乙烯醇缩醛	23.00	18.80	16 [#]	S-2/Dyneema	聚碳酸酯		20.55

实验分三组:第一组为 C 型钢靶板抗弹实验;第二组为 FRC 靶板抗弹实验;第三组为前置 3.92mm 厚 C 型钢板与 FRC 组合靶板抗弹实验。在舰船结构中,防弹板结构前面有钢板(C 型钢板或 F-1G 防弹钢板),因此第三组实验模拟了舰船抗弹的实际情况。

第一组和第二组为单层靶板。靶板吸能量 E 及单位面密度吸能量 E_a 分别为

$$E = m(v_1^2 - v_2^2)/2 \quad (1)$$

$$E_a = E/(\rho H) \quad (2)$$

式中: m 为弹丸质量, v_1 、 v_2 为入靶及出靶速度, ρ 为靶板密度, H 为靶厚, ρH 为靶板面密度。

第三组为组合靶板。纤维板后置,靶板间距为 0 或 50mm。所测得的入靶及出靶速度为钢靶前速度 v_1 和 FRC 靶板靶后速度 v_2 。由式(1)可求出组合靶总吸能量 E , 然后采取近似计算,认为前置 C 型钢板吸能量不变,取钢板实测吸能量的平均值为 E_1 , 组合靶中 FRC 板的吸能量 $E' = E - E_1$ 。则对应的单位面密度吸能量为: $E'_a = E'/(\rho H)$ 。

3 实验结果及分析

3.1 钢靶板弹丸侵彻分析

3.92 mm 厚 C 型船体结构钢板抗尖头弹丸侵彻,弹孔孔径略大于弹丸直径,弹孔周边有较为明显的塑性流动痕迹,如图 3 所示。实验结果见表 2。由表 2 可知:3.92 mm 厚 C 型钢板抵抗弹速约为 720m/s, 剩余速度约为 600m/s, 弹丸穿透靶板后,弹丸头部墩粗。钢板单位面密度吸能量有较小幅度的波动,这是高动态实验不稳定性和结果离散性的结果。

3.2 前置钢板(有间隙)对 FRC 靶板抗弹性能的影响分析

FRC 靶板单一及组合抗弹实验结果见表 3~4。表中 G 表示 3.92mm 厚 C 型钢板。由表中实验结果可知,有间隙组合靶板中 FRC 靶板相对于其单一抗弹时,效果明显提高。考虑到前置 3.92mm 厚 C 型钢板对应吸能量近似不变(约为 705J),组合靶板中的 FRC 板的单位面密度吸能一般提高 50%~100%。单位面密度吸能大幅度提高的主要原因是:(1)弹丸穿过前置钢板后,弹头发生了较大的塑性变形,弹头墩粗,弹径增大,弹、靶接触面积增大,开坑时面压力相对下降,穿透能力相对降低;(2)弹丸偏转及前置钢板的崩落碎片分散,使弹丸和碎片对 FRC 靶板的作用面积增大;(3)弹丸着靶速度降低,7.62 mm 尖头弹丸在穿过前置钢板后的速度约 600m/s,较直接抗弹的 720m/s 左右已经降低了很多,从而提高 FRC 板抗弹性能。

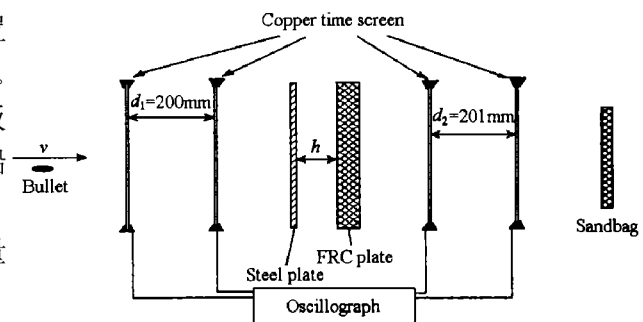


图 2 实验测试示意图

Fig. 2 Experiment set-up

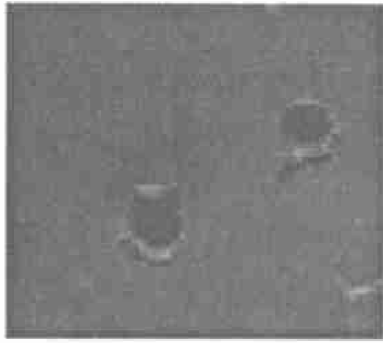


图 3 3.92mm 厚 C 型钢靶板抗弹破坏形貌
Fig.3 Damage mode of 3.92mm C type steel target perforated by bullet

表 2 3.92mm 厚 C 型钢靶板抗弹侵彻实验测试数据

Table 2 Experiment results for 3.92mm C type steel target perforated by bullet

实验 序号	$v_1/$ (m/s)	$v_2/$ (m/s)	$E/$ J	$E_a/$ (Jm ² /kg)	$E_v/$ J
1	728.3	606.0	644.24	21.3	669.98
2	717.9	606.0	584.81	19.4	669.98
4	717.9	565.2	773.82	25.6	669.98
5	707.7	546.7	797.83	26.4	669.98
6	717.9	613.4	549.21	18.2	669.98

注: 钢板面密度 $\rho_H = 30.2\text{kg/m}^2$

表 3 FRC 靶板单一抗弹实验测试数据

Table 3 Experiment results for fiber reinforced composite target

靶板 编号	$v_1/$ (m/s)	$v_2/$ (m/s)	$E_a/$ (Jm ² /kg)	靶板 编号	$v_1/$ (m/s)	$v_2/$ (m/s)	$E_a/$ (Jm ² /kg)
1 [#]	707.7	639.2	18.0	7 [#]	717.9	594.1	30.5
2 [#]	707.7	623.5	22.4	8 [#]	717.9	623.5	26.6
3 [#]	717.9	472.0	49.6	12 [#]	707.7	601.8	24.3
4 [#]	707.7	664.5	17.2	13 [#]	728.3	600.0	30.7
5 [#]	707.7	587.2	32.1	13 [#]	707.7	579.5	29.8
6 [#]	717.9	485.6	59.0				

表 4 组合靶板抗弹丸穿甲实验测试数据

Table 4 Experiment results for combined target

组合靶 形式	$h/$ mm	$v_1/$ (m/s)	$v_2/$ (m/s)	$E_a/$ (Jm ² /kg)	组合靶 形式	$h/$ mm	$v_1/$ (m/s)	$v_2/$ (m/s)	$E_a/$ (Jm ² /kg)
G+3 [#]	0	707.7	437.4	23.7	G+8 [#]	50	717.9	299.4	53.8
G+12 [#]	0	739.0	488.3	24.1	G+5 [#]	50	707.7	271.9	52.9
G+13 [#]	0	697.9	433.6	23.3	G+6 [#]	50	707.7	0	> 70.0
G+3 [#]	50	728.3	241.8	51.2	G+9 [#]	50	697.9	256.4	48.7
G+12 [#]	50	728.3	0	> 63.1	G+10 [#]	50	717.9	331.3	47.5
G+13 [#]	50	697.9	295.9	41.5	G+11 [#]	50	728.3	292.4	52.97
G+1 [#]	50	717.9	428.1	31.6	G+14 [#]	50	704.2	0	> 60.76
G+2 [#]	50	717.9	269.0	54.5	G+15 [#]	50	714.3	331.1	43.84
G+4 [#]	50	717.9	405.6	52.6	G+16 [#]	50	704.2	251.3	49.84
G+7 [#]	50	728.3	237.3	57.3					

FRC 靶板单一抗弹与组合抗弹破坏模式有明显区别, 如图 4~6 所示。单一抗弹时, FRC 靶板迎弹面与背弹面弹孔均较小, 靶板分层面积小。但与 3.92mm 厚 C 型钢组合抗弹时, 弹孔有较为明显的扩张, 玻纤背弹面成花瓣状, 芳纶纤维背弹面有明显的分层、凸起现象(图 5)。高强聚乙烯纤维靶板(图 6)组合抗弹时靶板整体变形非常大, 背弹面整体凸起。

3.3 不同基体对 FRC 靶板抗弹性能的影响分析

由表 3、表 4 可知, 不同基体材料制作的 FRC 靶板, 抗弹性能表现出较大的差异, 较为明显的特性有: (1)改性酚醛树脂相对硬度和强度较高, 直接抗弹性能较好, 背弹面破坏模式成局部花瓣开裂。其中 3[#]靶板直接抗弹单位面密度吸能量为 49.6Jm²/kg。而前置钢板(有间隙)后的组合靶板中, 单位面密度吸能量为 51.2Jm²/kg, 变化不大; (2)聚碳酸酯(PC)为基体的 FRC 靶板, 韧性较好, 是热塑性材料,

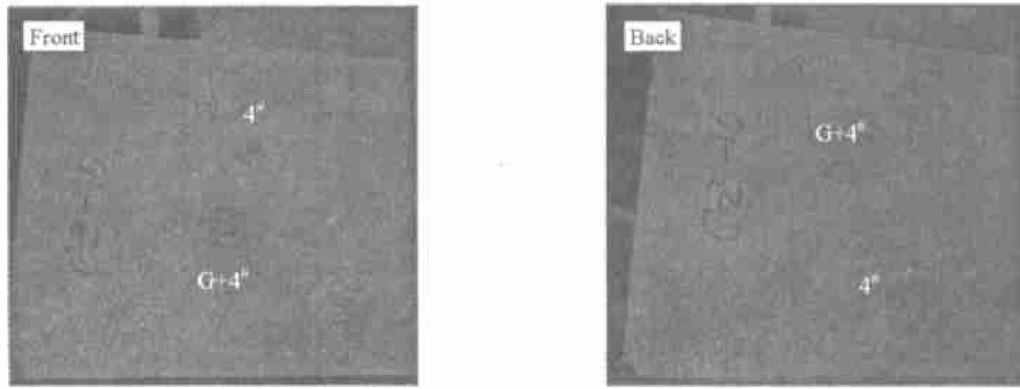


图 4 4[#]靶板单一及组合抗弹迎弹面和背弹面破坏形貌

Fig.4 Damage of front and back of 4[#] target with and without steel target ahead perforated by bullet

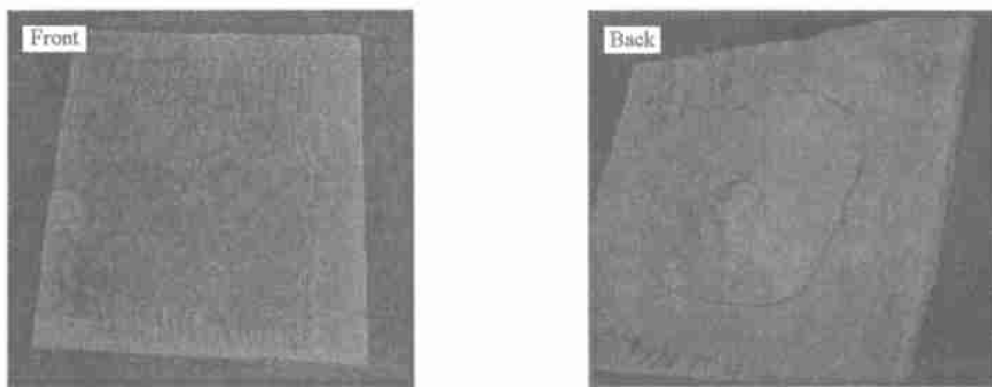


图 5 G+15[#]靶板迎弹面玻纤层侵彻孔及背弹面芳纶纤维层分层、凸起

Fig.5 Damage of front and back of G+15[#] target perforated by bullet

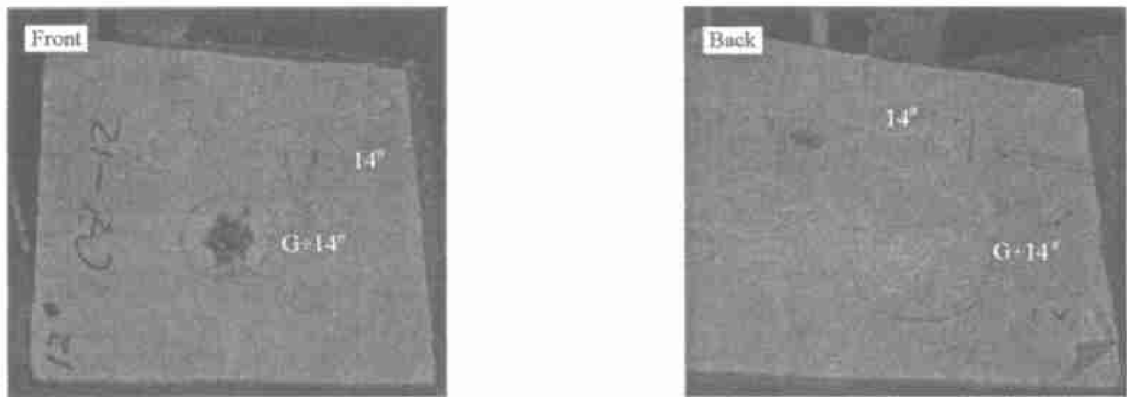


图 6 14[#]靶板单一及组合抗弹时迎弹面和背弹面破坏形貌

Fig.6 Damage of front and back of 14[#] target with and without steel target ahead perforated by bullet

直接抗弹时,性能一般,单位面密度吸能量为约 $20\text{Jm}^2/\text{kg}$ 。前置钢板后(有间隙),单位面密度吸能量增至 $31.6 \sim 54.5\text{Jm}^2/\text{kg}$ (如 1[#]、2[#]、9[#]、10[#]、11[#]靶板),这说明聚碳酸酯为基体的 FRC 靶板适合抵御弹速较低、钝头及高温弹丸的侵彻。(3)基体含胶量对 FRC 靶板抗弹性能影响较大,如 1[#]、2[#]靶板含胶量分别为 26.15%、17%,前置钢板后,单位面密度吸能量分别为 $31.6、5\text{Jm}^2/\text{kg}$ 。

3.4 不同纤维材料对 FRC 靶板抗弹性能的影响分析

综合 3 组实验结果,纯高强聚乙烯纤维靶板及其与钢板组合靶的抗弹性能最高(6[#]和 G+6[#]靶板单位面密度吸能量分别为 59 和 $70\text{Jm}^2/\text{kg}$),高强聚乙烯和玻纤复合的 14[#]靶板的组合抗弹性能高达 $60.76\text{Jm}^2/\text{kg}$ 。这说明高强聚乙烯纤维增强复合材料较玻纤和芳纶纤维增强复合材料的抗弹性能更为优异。

纯芳纶纤维的单一直接抗弹性能与 S-2 玻纤相当, 前置钢板的纯芳纶纤维增强纤维靶板的抗弹性能高于 $52\text{Jm}^2/\text{kg}$, 如 G+5[#]、G+4[#] 靶板分别为 52.9 、 $52.6\text{Jm}^2/\text{kg}$ 。

S-2 玻纤和部分芳纶纤维混杂的 FRC 靶板抗弹时单位面密度吸能量达 $53.3 \sim 60\text{Jm}^2/\text{kg}$ (如 G+7[#]、G+8[#] 靶板), 分别为 57.3 、 $53.8\text{Jm}^2/\text{kg}$, 不仅性能与高强聚乙烯相当, 而且超过纯芳纶纤维复合靶板, 因此, 是性价比较高、防弹性能较好的方案。

3.5 组合靶板结构对抗弹丸侵彻能力的影响分析

对表 4 中的组合结构 G+3[#]、G+12[#] 及 G+13[#] 的抗弹性能比较可见: 前置钢板与 FRC 靶板之间靠紧布置, 组合靶板的抗弹性能大大降低, 组合靶中 FRC 板的单位面密度吸能量只有 $23.3 \sim 24.1\text{Jm}^2/\text{kg}$; 而相同的 FRC 板采用有间隙设置前置钢板 (间距 $h=50\text{mm}$), 抗弹性能提高, 单位面密度吸能量达到 51.2 、 63.1 和 $41.5\text{Jm}^2/\text{kg}$ 。其原因主要有两个方面: 一是靠紧布置无二次开坑, 弹丸侵彻达到最佳效果; 二是有间隙布置使弹丸产生偏转及二次开坑, 作用面积大大增加等。

4 结 论

(1) FRC 板作为防弹装甲材料较 C 型钢板具有较为明显的优势。

(2) 弹丸速度和形状对 FRC 板的抗弹性能有较大影响。弹速低、弹头钝, FRC 靶板的单位面密度吸能量高, 反之则单位面密度吸能量低。

(3) 基体种类和基体含量对 FRC 板的抗弹性能有一定影响, 硬度、强度高的, 适于相对较高弹速的防护。而基体含量对 FRC 板的破坏模式有较大影响, 从而影响其抗弹性能。

(4) 几种防弹 FRC 靶板的抗弹性能实验结果显示: 高强聚乙烯纤维材料是其中最为优异抗弹材料, 而 S-玻纤与芳纶纤维混杂的部分复合材料靶板也有较好的表现, 其抗弹性能略低于高强聚乙烯纤维靶板, 但超过了纯芳纶纤维复合靶板, 是性能价格比最高、防弹性能最好的方案, 也是最具研究价值的组合形式。其抗弹机理还有待进一步的深入研究。

(5) FRC 板与 C 型钢板采取不同的组合形式, 对整体的抗弹性能有较大的影响, 靶板间距的增大将有利于组合靶板综合抗弹能力的提高, 但舰船空间有限, 靶板间距将参考舰船的骨架高度进行设计。

参考文献:

- [1] 张佐光, 李岩, 殷立新, 等. 防弹芳纶复合材料实验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 1995, 21(3): 1-4.
ZHANG Zuo-guang, LI Yan, YIN Li-xin, et al. Experimental research on ballistic properties of aramide composites[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1995, 21(3): 1-4.
- [2] 陈利民. 织物特性对防弹复合材料弹道性能的影响[J]. 纤维复合材料, 1995(9): 6-10.
CHEN Li-min. The effect of textile mechanism for bulletproof capability of composites [J]. Fiber Composites, 1995(3): 6-10.
- [3] 梅志远, 朱锡, 张振中. 舰船装甲防护的研究与进展[J]. 武汉造船, 2000(5): 5-12.
MEI Zhi-yuan, ZHU Xi, ZHANG Zhen-zhong. The research and development of warship's armor[J]. Wuhan Shipbuilding, 2000(5): 5-12.
- [4] 朱锡, 张振中, 刘润泉. 混杂纤维增强复合材料抗弹丸穿甲的实验研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2000, 23(1): 3-7.
ZHU Xi, ZHANG Zhen-zhong, LIU Run-quan. Experimental investigation of mingled-fiber composites impacted by bullets[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2000, 23(1): 3-7.
- [5] Abrate S. Impact on laminated composites: recent advances[J]. Application Mechanics Review, 1994, 47(11): 517-544.
- [6] ZHU G, Goldsmith W, Dharan C K H. Penetration of laminated kevlar by projectiles — I . Experimental investigation [J]. International Journal of Solids Structures, 1992, 29(4): 399-420.

Warship's light composite armor structure resistibility for ballistic impact

ZHU Xi¹, MEI Zhi-yuan¹, LIU Run-quan¹, CHA You-qi², WANG Xiao-xia²

(1. Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, Hubei, China;

2. Naval Agent of Jiangnan Shipbuilding Factory, Shanghai 200092, China)

Abstract: 400mm×400mm fiber reinforced composite material (FRC) armor panel behind the ship's C type steel panel was used to simulate warship's light composite armor, and the ballistic velocity penetration experiments for the different FRC armor panel and the different structural status, such as space certain clearance or no between the two parts, have been done. The absorbed energy of FRC during the penetration in the situation above have been recorded and analyzed.

Key words: mechanics of explosion; fiber reinforced composite material; composite armor; ballistic experiment; warship's armor

第七届全国爆炸力学学术会议通知

为促进我国爆炸力学理论与技术领域学术研究的的发展,中国力学学会爆炸力学专业委员会决定,将于2003年11月在云南昆明举行第七届全国爆炸力学学术研讨会。现将会议有关事宜通知如下。

一.会议时间 2003年11月

会议地点 云南昆明

二.学术交流内容

- | | |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. 炸药的起爆机理, SDT 与 DDT 问题, 爆轰波的传播与相互作用, 气相、粉尘、云雾爆轰现象及其相关理论, 凝聚相爆轰理论; 2. 爆炸对金属的直接作用, 爆炸对板壳的驱动加速, 聚能效应及破甲理论, 装药与金属的爆炸耦合效应及其在战斗部技术领域的应用; 3. 空气中、水中及岩土中爆炸的动力学问题; 4. 高速与超高速碰撞现象, 侵彻动力学及装甲防护理论与技术; 高速冲击下杆件的动态屈曲问题; 5. 材料的绝热剪切现象, 材料的动态损伤与断裂, 应力波及论文要求 | <ol style="list-style-type: none"> 其相互作用理论; 6. 材料的动态本构与高压状态方程; 7. 爆炸成型与加工, 复合与焊接, 压实与烧结等相关问题; 爆炸及冲击等动高压下的相变现象, 超硬材料及其它特性新材料的冲击合成研究; 动高压下材料的物理现象; 8. 爆炸及冲击效应的安全防护及其评估研究; 9. 激光和其它高能粒子束对材料的作用; 10. 各种爆炸与冲击动力学数值模拟理论与方法; 11. 爆炸与冲击动力学实验技术与方法; 12. 其它与爆炸力学相关的学科理论与技术。 |
|--|---|

1. 论文必须是未公开发表过的, 中英文均可;

2. 凡录用的论文, 将由出版社正式出版, 并收取适当的版面费。

会议筹备日程表

1. 2003年3月30日前, 论文作者提交不超过500字的论文摘要, 并申报是否参加会议的意向;

2. 2003年6月底为提交论文的截止日期;

3. 2003年7月, 爆炸力学专业委员会组织专家进行论文评审, 7月底发出论文录用通知及参加会议相关事项的通知。

三. 会议由北京理工大学承办

联系人 黄风雷, 张庆明, 张宝平, 陈 利

地址 100081 北京理工大学爆炸灾害预防与控制国家重点实验室

电话 (010)68914284 E-mail lichenme@bit.edu.cn

中国力学学会爆炸力学专业委员会

北京理工大学爆炸灾害预防与控制国家重点实验室

2003年1月