

文章编号: 1001-1455(2006)02-0150-06

# 铝质舰体轻型复合装甲试验研究\*

梅志远<sup>1</sup>, 谭大力<sup>2</sup>, 朱 锡<sup>1</sup>, 刘润泉<sup>1</sup>

(1. 海军工程大学船舶与海洋工程系, 湖北 武汉 430033;

2. 海军装备研究院舰船所, 北京 100073)

**摘要:** 以纤维增强复合材料(FRP)层合板前置铝板模拟铝质舰体轻型复合装甲结构, 对采用不同增强纤维 FRP 层合板有间隙复合装甲结构进行 7.62 mm 制式尖头弹打靶试验。基于 FRP 抗弹机理的分析, 着重讨论了入射角度和增强纤维种类对组合装甲结构抗弹性能的影响, 对铝质舰体设置轻型复合装甲以抵御小口径武器攻击的可行性进行评估。

**关键词:** 爆炸力学; 舰船防护; 复合装甲; 铝质结构; 穿甲试验

**中图分类号:** O385

**国标学科代码:** 130 · 3530

**文献标志码:** A

## 1 引言

由于舰船稳性、快速性以及排水量等特殊要求, 大中型舰船的上层建筑和小型高速快艇的艇体较普遍地采用铝合金作为船体结构材料。然而反舰武器破片的二次杀伤和小口径武器攻击下铝质船体结构薄弱的抗穿透能力对舰船的生命力以及舰员、设备的安全提出了严峻挑战。朱锡等<sup>[1~2]</sup>曾针对前置船体钢的舰用轻型复合装甲进行了正侵彻弹道试验研究, 认为玻纤和芳纶混杂增强复合材料防弹板的防护效率较防弹钢高 30% 以上; J. R. Osborn<sup>[3]</sup>针对美国海岸警卫队巡逻艇, 分别进行了前置船用钢板(或铝板), 后置 SRP 和 KRP 复合材料防弹板组合结构的系列正侵弹道测试, 对设置轻型复合装甲的可行性进行研究。然而对于铝质结构和弹体以不同角度入射条件下的装甲结构性能评估的工作, 目前报导较少。本文中针对玻纤、芳纶、超高强聚乙烯以及其混杂增强复合材料防弹板前置结构铝板模拟铝质舰体有间隙轻型复合装甲结构, 进行 7.62 mm 制式枪械的打靶试验, 着重考虑入射角度和增强纤维种类对组合结构抗弹性能的影响, 对铝质舰体设置轻型复合装甲以抵御小口径武器攻击的可行性进行评估。

## 2 防御目标和防护结构分析

根据水面舰艇战术技术性能要求和设置轻型复合装甲的效费合理性分析, 铝质舰艇结构的主要防御目标为反舰武器破片的二次杀伤和小口径武器的攻击。而根据弹体头部形状以及长径比等参数的分析, 在相同能量等级的高速冲击下, 制式尖头弹丸(长径比大于 2)穿透钢甲的能力将高于长径比接近于 1 的高速小质量破片<sup>[5]</sup>。因此本文的主要防御目标确定为 7.62 mm 口径制式尖头钢芯弹丸, 弹体质量 7.9 g, 弹体速度约为 700 m/s, 发射装置为 81 式自动步枪, 通过固定式枪架发射。同时考虑到舰体的倾斜式结构特点, 试验中同时针对 45° 斜角入射的工况进行研究。

对于轻型复合装甲结构的考虑, 目前 FRP 层合板对小质量高速目标冲击的防护, 其直接抗弹的防护水平一般低于 2 kJ, 此时 FRP 层合板的防御效率较高, 当防御冲击能量水平高于 3 kJ 时, 常采用前置钢板或陶瓷面板组成轻型组合结构进行防御<sup>[4]</sup>。文中防护结构将采用铝质结构板为前置板, 有间隙后置 FRP 层合板组成防护结构。由于铝板的硬度较低, 相对于钢(陶瓷)/FRP 结构, 无疑将对后置 FRP 结构的抗弹性能提出更高要求, 因此, 文中将重点针对玻纤、芳纶以及高强聚乙烯等多种纤维增强

\* 收稿日期: 2005-02-21; 修回日期: 2005-06-16

作者简介: 梅志远(1973—), 男, 博士, 讲师。

材料 FRP 层合板进行抗弹能力和重量等性能指标的综合分析。

### 3 弹道冲击试验

#### 3.1 试验原理

弹体的初始速度和剩余速度通过在靶板前、后分别设置锡箔纸,采用计时器法<sup>[6]</sup>进行测量。在相同弹道条件下,靶板的抗弹能力通过靶板在抗弹(弹丸穿甲)过程中的吸能量来衡量,并通过打靶试验进行实测。当已知弹丸入靶前速度  $v_0$ 、出靶后速度  $v_r$ 、弹丸质量  $m$  时,靶板吸能量

$$E = mv_0^2/2 - mv_r^2/2 \tag{1}$$

当靶板的吸能量提高,致使弹丸无法穿透时,靶后速度  $v_r=0$ ,该临界状态的吸能量

$$E_{cr} = mv_0^2/2 \tag{2}$$

此时所对应的  $v_0$ ,工程上常采用  $v_{50}$  进行描述。 $v_{50}$  是装甲试验测试中的一个重要参数,一般定义为,最低完全穿透速度和最高未穿透速度差别小于 50 m/s 的 6 发弹速的算术平均值定为靶板的 50% 穿透速度,即  $v_{50}$  弹道极限速度。由于  $v_{50}$  测试对试验条件和试验费用要求很高,工程中常采用靶板单位面密度吸能量来评估靶板的抗弹性能。设靶板材料密度为  $\rho$ ,厚度为  $H$ ,则单位面密度吸能量

$$E_a = E/(\rho H) \tag{3}$$

式中: $\rho H$  表示靶板材料的面密度。

#### 3.2 试验靶板

目前防弹用增强纤维主要为高强玻璃纤维(S-玻纤)和芳纶纤维(如美国的 kevlar 纤维和荷兰 Twaron 纤维),以及 20 世纪 90 年代后发展起来的高强聚乙烯纤维(如 Spectra 和 Dyneema 系列等)。为综合比较各型 FRP 层合板的抗弹性能,本文中实验靶板所采用的增强织物主要为 S-2、Twaron750 平纹织物和 Spectra900 单向正交铺层结构,各型复合材料靶板的序号、尺寸、面密度及基体材料见表 1。前置铝板的型号分别为 LF21 和 LF5,其面密度、强度等性能参数见表 2。

表 1 试验所用复合靶板性能参数

Table 1 FRP constituted parameters used for test

序号	基体材料及比例	增强织物	靶板尺寸/mm	面密度/(kg/m <sup>2</sup> )
A1	E220-901	T750	300×301	13.62
A2	430(50%) + E220-901(50%)	T750	300×301	13.18
A3	580	T750	300×300	13.36
A4	580(50%) + E220-901(50%)	T750	303×300	13.29
B1	E44 环氧(70%) + 丁腈(15%) + 三乙烯四胺(14%)	T750 + 玻纤	315×315	38.70
B2	PC	T750 + 玻纤	300×300	32.41
C1	聚乙烯	Spectra900	300×300	22.56
C2	聚乙烯	Spectra900	300×300	27.76
C3	430(50%) + E220-901(50%)	Spectra900	298×300	20.38

表 2 铝板性能参数

Table 2 Material parameters for aluminum target

编号	牌号	面密度/(kg/m <sup>2</sup> )	屈服应力/MPa	极限强度/MPa	断裂延伸率/%
L1	LF21	8.3	—	113~118	33.0~39.0
L2	LF5	14.1	153~163	306~310	21.9~26.2

#### 3.3 试验结果

首先分别针对两型铝板(表 3 中 1~7)及其有间隙组合结构(表 3 中 8~9)的抗弹性能进行 0°和 45°弹道测试,间隙组合结构中两铝板间隔 30 mm,测试结果如表 3 所示。

在铝板结构抗弹性能试验测试的基础上,针对前置铝板有间隙(间隙距离 50 mm)后置复合防弹板的组合结构进行抗弹性能的测试。由于弹速的测量仅针对组合靶板前后的弹体速度,因此对于复合材

料的单位面密度吸能量  $E_{af}$ , 将由组合结构的总吸能量减去铝板平均吸能量, 然后除以复合材料板的面密度得到。具体测试结果如表 4 所示。

表 3 铝板抗弹性能试验测试结果

Table 3 Experimental results for aluminum target

序号	入射角度/(°)	$v_0/(m/s)$	$v_r/(m/s)$	靶板	$E_a/(J \cdot m^2/kg)$	$\bar{E}_a/(J \cdot m^2/kg)$
1	0	699.1	652.5	L2	17.8	
2	0	687.0	630.0	L2	21.1	20.1
3	0	693.0	635.4	L2	21.5	
4	45	695.0	620.0	L2	27.7	
5	45	696.0	621.9	L2	27.5	27.6
6	45	700.0	670.0	L1	19.5	19.5
7	0	688.0	664.0	L1	15.4	15.4
8	45	703.0	591.0	L1×5 (无间隙)	13.8	
9	45	690.0	536.0	L1×5 (有间隙)	17.9	15.9

表 4 复合材料组合结构弹道冲击测试结果

Table 4 Experimental results for combined target

序号	入射角度/(°)	$v_0/(m/s)$	$v_r/(m/s)$	靶板组合	$E_{af}/(J \cdot m^2/kg)$
10	45	692.0	516	L2+A1	33.2
11	45	685.0	509	L2+A2	33.6
12	45	684.0	518	L2+A3	29.9
13	0	692.0	513	L1+B2	22.0
14	45	689.0	506	L1+B2	22.9
15	45	684.0	458	L2+A4	47.5
16	45	687.0	511	L2+A4	33.5
17	45	690.0	0	L1+B1	>45.3
18	45	685.0	0	L1+C1	>77.7
19	0	690.0	0	L1+C2	>63.1
20	45	690.0	0	L2+C3	>73.3

## 4 试验结果分析

### 4.1 靶板的破坏模式及铝板抗弹性能分析

试验过程中, 弹道冲击下部分靶板的变形模式如图 1~3 所示。弹道冲击试验分别对两种型号铝板进行不同角度(45°和 0°)的弹道冲击测试, 得到单位面密度吸能量(见表 3)。实验结果显示, 不同角度入射时, 靶板的破坏模式基本一致, 均为塑性扩孔型破坏(见图 1), 在此条件下, 忽略弹体形变, 可认为靶板吸能量与弹体的侵彻路径成正比, 即

$$E_\theta = E_0 / \sin\theta \quad (5)$$

式中:  $\theta$  为入射角度,  $E_\theta$  为入射角为  $\theta$  时的靶板吸能量,  $E_0$  为垂直入射(0°)的靶板吸能量。

试验测试结果显示(见表 3): L2(LF5) 铝板垂直入射时平均单位面密度吸能量为 20.1 J·m<sup>2</sup>/kg, 则由式(5)计算, 45°入射时单位面密度吸能量应为 28.4 J·m<sup>2</sup>/kg, 试验测试结果平均单位面密度吸能量为 27.6 J·m<sup>2</sup>/kg; L1(LF21) 铝板分别为 15.4、19.5 J·m<sup>2</sup>/kg(计算值为 21.8 J·m<sup>2</sup>/kg), 计算误差说明弹体在侵彻过程中不同阶段的能量损失是不一致的, 如由于界面效应, 开坑阶段弹体单位侵深吸能量将高于后续延性扩孔阶段的单位侵深吸能量。

将两种铝材的抗弹性能进行对比, LF5 铝板由于具有较高的极限强度, 单位体积塑性变形能较高, 其抗弹性能优于 LF21 铝板(见表 2), 同样原因其抗弹效率低于相同弹道条件下(垂直入射)低合金高强度船用钢(屈服应力 450 MPa, 单位面密度吸能量约 22~25 J·m<sup>2</sup>/kg<sup>[2]</sup>)。

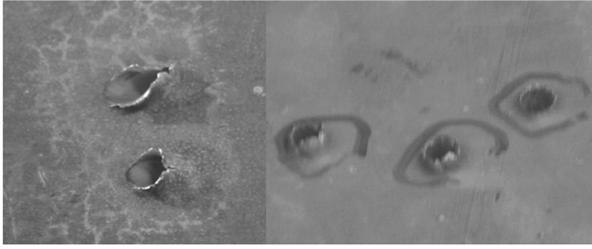


图1 45°(左)和0°(右)入射铝质靶板背板破坏变形模式  
Fig. 1 Damage mode of aluminum target perforated by bullet in 45° and 0°

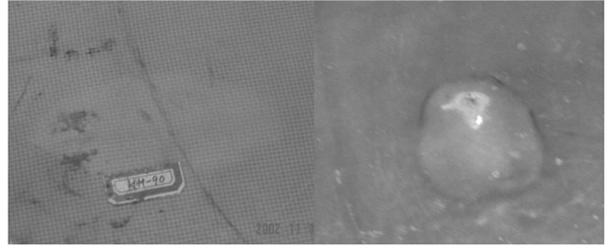


图2 B1靶板迎弹面(左)及背弹面(右)破坏变形模式  
Fig. 2 Damage mode of B1 target

针对多层铝板叠加后的抗弹性能进行研究(试验7~9)。试验结果显示,当单层防弹时,LF21的单位面密度吸能量为 $15.4 \text{ J} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ (试验7),而五层板连续放置时(试验8)的单位面密度吸能量为 $13.8 \text{ J} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ ,五块铝板按前面放一块,隔一定距离后放另外四块的方法放置时(试验9),其单位面密度吸能量变为 $17.9 \text{ J} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ 。多层铝板无间隙叠放时,由于应力波的透射,后置板在弹体侵彻前置板时已处于较高应力水平,后置板界面开坑吸能效应将大大下降;后置板限制了前置板冲击区靶材向后运动形变;靶板无间隙叠放弯曲刚度增大,限制了靶板的整体形变吸能。因此,认为多层无间隙叠放结构限制了冲击能量扩散,不利于抗弹性能提高。而有间隙布置时,靶板界面效应和薄板抗弹优势得到体现,抗弹能力提高,但由于前置板的冲塞质量对后置板的影响,组合板结构的单位面密度吸能量略低于单一靶板,同时多层有间隙结构对空间要求较高。因此,基于抗弹效率和空间的要求,结构防护能力必须考虑在背层设置复合材料防弹板。

#### 4.2 芳纶-玻纤复合板的抗弹性能分析

首先针对铝板+复合材料(SRP和KRP)防弹板组合结构的抗弹性能进行研究。复合材料防弹板包括A1~A4(单一芳纶织物增强)、B1~B2(混杂织物增强)共六块靶板。

关于玻纤、芳纶复合材料结构抗弹性能已进行了大量的研究<sup>[6]</sup>,混杂纤维结构防弹板的抗弹性能研究近年来也得到高度重视<sup>[1~2]</sup>。一般认为,结构设计(主要包括增强纤维材料和基体材料的选取、含胶量的控制、铺层设计等)优异的FRP防弹板在中、低能冲击( $<2 \text{ kJ}$ )下,由于背层的大挠度、大面积协调变形吸能作用以及纤维材料较高的拉伸断裂应变能量密度等吸能特性而具有良好的抗弹效率。而高速弹体冲击下,应变率效应虽能在一定程度上提高材料的断裂强度,但影响靶板抗弹效率的其他重要影响因素如冲击能量的扩展速度(主要取决于材料的剪切波传播速度)不变以及断裂延伸率下降,冲击速度的提高将减小靶板冲击扰动区域的范围(即变形锥半径)<sup>[4,7]</sup>和吸能体积。因此在相同弹道条件下,与钢+复合材料装甲结构(SRP或KRP的 $E_{af}$ 一般为 $50 \text{ J} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ )相比<sup>[2]</sup>,铝+复合材料装甲结构中复合材料结构(SRP或KRP的 $E_{af}$ 一般为 $30 \sim 40 \text{ J} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ )的抗弹效率普遍偏低。在此基础上对试验结果进行分析:

(1)采用芳纶增强纤维(T750)和与S-2玻纤混杂复合材料防弹板有间隙与铝板组合时,抗弹效率均高于铝板(或船用钢板)的抗弹效率;其中T750芳纶防弹板的面密度吸能量一般高于 $30 \text{ J} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ ,具有较好的抗弹性能。

(2)全芳纶防弹板的抗弹效率高于芳纶/玻纤混杂层板的抗弹效率;但通过改善混杂防弹板结构和

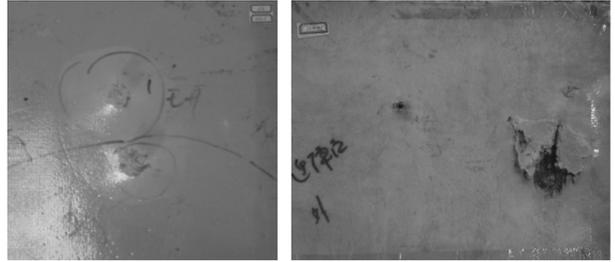


图3 A4靶板(背弹面,穿透,左)及C1靶板(迎弹面,弹丸跳弹,右)组合抗弹时破坏变形模式  
Fig. 3 Damage mode of A4 (left) and C1 (right) target perforated by bullet

提高靶板面密度,能在一定程度上提高混杂层板的综合抗弹能力,其单位面密度吸能量达到了  $45.3 \text{ J} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$  (试验 17)。这主要与层合板的厚度效应、基体材料种类等相关因素有关。当层合板层间粘接较弱时,厚度增加,有利于背层纤维的协调变形吸能,产生背层凸起大变形吸能模式(见图 2),从而提高靶板整体抗弹效率。

(3)试验结果显示,斜角入射条件下防弹板抗弹效率相对于垂直入射,一般均有较大幅度提高。从靶板破坏模式分析可知,斜角入射对复合材料靶板的影响主要发生在迎弹面。由图 3 观察,迎弹面靶板撕裂翻起,扰动区域明显高于垂直入射,而且由于层合板面内强度远高于厚度方向,弹体在侵彻过程中面内阻力分量较高,此时容易发生跳弹,而背弹面影响相对较小。

### 4.3 超高强聚乙烯纤维复合板的抗弹性能分析

针对超高强聚乙烯纤维复合材料板,试验中采用三种结构形式(C1~C3)。在相同弹道条件下弹丸均被防住。可见由于超高强聚乙烯纤维具有比芳纶、玻纤更高的强度、抗拉伸和剪切模量以及更低的密度,其抗弹性能具有明显优势。其单位面密度吸能量在  $60 \sim 70 \text{ J} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$  以上,是良好的抗弹材料。但由于聚乙烯纤维复合板的耐火性能较差(可使用温度低于  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ ),因此它在舰船上的使用受到限制,需进行化学改性或采取隔热措施,待提高其耐温性及阻燃性等性能后方能投入使用。

## 5 铝质舰体轻型复合装甲防护的可行性分析

针对所提出的防御目标,根据试验研究结果,对铝质舰体轻型复合装甲防护的可行性进行初步评估如下:防御目标为  $7.9 \text{ g}$ ,初速  $650 \text{ m/s}$ ,防御动能为  $1\,668.8 \text{ J}$ ,设前置铝板为  $6 \text{ mm}$  LF5 型板, $45^\circ$ 入射时,其单位面密度吸能量为  $27.6 \text{ J} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ ,则弹道吸能为  $447.1 \text{ J}$ 。此时以超高强聚乙烯结构靶板(试验 18~20)为例,其单位面密度吸能量为  $71.4 \text{ J} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ (均值),则将弹体剩余动能除以单位面密度吸能量,可知复合材料板每平方米质量应为  $17.1 \text{ kg}(1.7 \text{ T}/(100\text{m}^2))$ 。对于全芳纶结构和混杂结构,分别参考试验 15 和 17 的试验数据,可得其每百平方米复合材料板质量分别为 2.5、2.7 T。

## 6 结 论

(1)由于材料的强度差异,铝质舰体结构的单位面密度吸能量略低于高强度合金船体钢,相同厚度的铝质结构其抗弹能力将远低于船体钢结构。

(2)如果不加任何防弹材料,单纯依靠铝板舰艇将无法抵御小口径武器的打击。采用多层铝板间隔布置,在一定程度上能够提高防弹能力,但效果不明显,且受到舰艇空间的限制。

(3)采用芳纶/玻纤混杂复合板作为防弹材料,通过调整靶板结构其防弹效率基本接近于全芳纶靶板结构。采用聚乙烯纤维复合板作为防弹材料,能较好地防御小口径武器的攻击。

(4)完全防御  $7.62 \text{ mm}$  制式尖头弹的攻击,每百平方米所需复合材料的质量,超高强聚乙烯结构所需质量最小,为  $1.7 \text{ T}/(100\text{m}^2)$ 。而采用玻纤/芳纶混杂结构其质量将达到  $2.7 \text{ T}/(100\text{m}^2)$ 。

### 参考文献:

- [1] 朱锡,梅志远,徐顺棋,等. 高速破片侵彻舰用复合装甲模拟实验研究[J]. 兵工学报,2003,24(4):463-468. ZHU Xi, MEI Zhi-yuan, XU Sun-qi. Experimental research on penetration of high-velocity fragment for warship's composite armor[J]. Acta Armamentarii, 2003,24(4):463-468.
- [2] 朱锡,梅志远,刘润泉,等. 舰用轻型复合装甲结构及其抗弹试验研究[J]. 爆炸与冲击,2003,23(1):61-67. ZHU Xi, MEI Zhi-yuan, LIU Run-quan, et al. Warship's light composite armor structure resistibility for ballistic impact[J]. Explosion and Shock Waves, 2003,23(1):61-67.
- [3] Osborn J R. Evaluation of composite armour for coast guard vessels[R]. AD-A209843,1992.
- [4] Navarro C. Simplified modeling of the ballistic behaviour of fabrics and fibre-reinforced polymeric matrix composites[J]. Key Engineering Materials, 1998(141-143):383-400.
- [5] 钱伟长. 穿甲力学[M]. 北京:国防工业出版社,1984:218-280.

- [6] 梅志远, 朱锡, 张立军, 等. 纤维增强复合材料层合板弹道冲击研究进展[J]. 力学进展, 2003, 33(3): 375—389.  
MEI Zhi-yuan, ZHU Xi, ZHANG Li-jun, et al. The developments of fibre-reinforced composite laminates under ballistic impact[J]. Advances in Mechanics, 2003, 33(3): 375—389.
- [7] Morye S S, Hine P J, Duckett R A, et al. Modelling of the energy absorption by polymer composites upon ballistic impact[J]. Composite Science and Technology, 2000, 60: 2631—2642.

## Experimental research on light composite armor of warship with aluminum alloy structure

MEI Zhi-yuan<sup>1\*</sup>, TAN Da-li<sup>2</sup>, ZHU Xi<sup>1</sup>, LIU Run-quan<sup>1</sup>

(1. Department of Naval Architecture & Ocean Engineering,  
Naval University of Engineering, Wuhan 430033, Hubei, China;  
2. Academes of Naval Equipment, Beijing 100073)

**Abstract:** The ballistic impact experiments for composite armor system, which combined with aluminum ahead and FRP behind, were carried out by 7.62 mm caliber uniform firearms. Experimental results and ballistic-resistance mechanism of aluminum target and FRP laminates were analyzed, and the affection of penetration angle and the ballistic-resistance ability for different kinds of reinforced-fiber (including T750, T750/S2 and Spectra900) were discussed. The resistance of aluminum alloy structure with composite armor to small-bore weapon impact was evaluated. Results show that 1.7 T/(100m<sup>2</sup>) is needed for Dyneema900 FRP and 2.7 T/(100m<sup>2</sup>) for S/T hybrid FRP to defense 7.62 mm caliber uniform firearms attacking.

**Key words:** mechanics of explosion; warship's defense; composite armor; aluminum alloy structure; impact test

---

\* Corresponding author: MEI Zhi-yuan  
E-mail address: zhiyuan\_mei@163.com  
Telephone: 027-83443120