复 合 材 料 学 报　　第 20 卷　第 4 期　8 月　2003 年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA　　Vol. 20　No. 4　August　2003

文章编号: 1000-3851( 2003) 04-0133-03

# 复合装甲中吸波层对材料防弹性能的影响

周耀权[1], 周　庆[2], 张佐光[1], 王　韬[2]
( 1. 北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100083; 2. 中纺投资发展股份有限公司研发中心, 北京 100176)

**摘　要:** 冲击波对复合装甲的破坏程度和方式受到一些因素的影响。采用吸波层来减弱冲击波对材料本身的破坏程度, 初步研究了冲击波破坏装甲的形式和机理, 并从防止冲击波振荡叠加的角度提出一些提高复合装甲防弹性能的措施。试验结果表明, 使用吸波层使复合装甲的防弹性能有了明显的提高。

**关键词:** 复合装甲; 冲击波; 吸波层
**中图分类号:** TB332　　**文献标识码:** A

# INFLUENCE OF THE WAVE-ABSORBED LAYER USED IN THE COMPOSITE ARMOR ON BALLISTIC PERFORMANCE OF THE MATERIAL

ZHOU Yaoquan[1], ZHOU Qing[2], ZHANG Zuoguang[1], WANG Tao[2]
( 1. School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China; 2. R&D Center of Sinotex Investment Development Co. Ltd, Beijing 100176, China)

Abstract: The degree and pattern of damage in composite armors influenced by the shock wave were decided by comprehensive factors. Herein, a wave-absorbed layer was used to decrease the degree of damage in materials by shock wave. Meanwhile, some effective measures were adopted to improve the ballistic performance of composite armors based on decreasing the reflection and overlapping of the shock wave. The experiment results shows that the wave-absorbed layer improves the ballistic performance of composite armors remarkably.

Key words: composite armor; shock wave; wave-absorbed layer

通常提高复合材料防弹性能的方法是进行复合材料结构和参数的设计[1], 但当基体和纤维的防弹性能发挥到极限后, 再大幅度提高复合材料的防弹性能, 难度很大。试验中, 应用冲击波理论, 从优化吸波层的角度出发, 提出提高复合材料防弹性能的方案。试验中发现, 冲击波对复合装甲的防弹性能有较大的影响, 主要使基体开裂分层、使纤维拉伸受损, 通过合理应用自行设计的低成本、低密度的吸波层, 研究了如何削弱冲击波振荡叠加对装甲防弹性能产生的负面影响。

## 1　弹道冲击实验

弹击试验用枪为 79 式轻型冲锋枪, 试验用弹为 7.62 mm 钢芯弹, 射击距离为 5 m, 弹速范围为 505～515 m/ s, 射击角度为 0°。复合靶板的防弹钢板厚度为 2.3 mm 和 1.3 mm; 防弹复合材料为 UHMWPE 纤维增强树脂基复合材料, 其中增强体为自行开发的具有特殊防弹结构的 BF1850 织物, 基体为热固性树脂。靶板如图 1 所示。试验所采用的靶板是由厚度为 1.3 mm 的防弹钢板与 UHMWPE 纤维增强树脂基复合材料组合而成的硬质防弹装甲( 防弹钢板的厚度为 1.3 mm, 9 层织物组成的复合材料的厚度为 5.5 mm), 并在背面附有自制吸波层( 厚度为 2 mm)。

收稿日期: 2002-11-12; 收修改稿日期: 2003-04-02
作者介绍: 周耀权, 男, 硕士, 研究方向: 防弹复合材料。
通讯作者: 张佐光, E-mail: zgzhang@ public. bta. net. cn

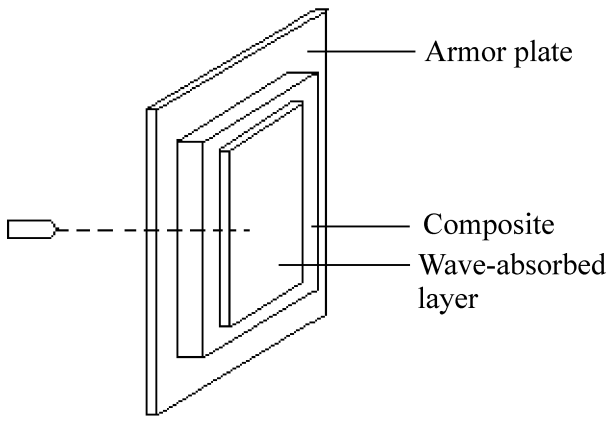


图 1　附有吸波层的复合装甲结构示意图

Fig. 1　Scheme of the composite armor with the wave-absorbed layer

## 2　基本原理

弹体冲击靶板的瞬间,能量以冲击波的形式传播,Laible[2]用动力学对此进行了描述和分析,冲击波的形式很复杂,根据物质微粒的相互作用形式主要可分为剪切波和压缩波,其中纵波的主要形式是压缩波,横波的主要形式是剪切波。

当冲击波由介质Ⅰ传播到介质Ⅱ时,在界面处会发生反射和透射现象,弹体垂直入射时,应力波反射系数 F 和冲击波透射系数 T 的计算公式[3]为

$$F = (d_2C_2 - d_1C_1)/(d_2C_2 + d_1C_1) \quad (1)$$

$$T = 2d_2C_2/(d_2C_2 + d_1C_1) \quad (2)$$

其中,$d_1C_1$ 和 $d_2C_2$ 分别为介质Ⅰ和介质Ⅱ的波阻抗。当 $d_2C_2 < d_1C_1$ 时,$F < 0$,反射波与压缩波相反,即压缩波反射后成为拉伸波。

针对冲击波传播的原理,吸波材料采用的原则是:在波阻抗方面,吸波层的材料应与复合材料相匹配;在波的衰减系数方面,吸波层材料的衰减系数较高;制备工艺简单。

表 1 列出了复合装甲中相关材料的波参数。

表 1　相关材料的波参数

Table 1　Wave parameters of some materials

| | Density /(g·cm$^{-3}$) | Velocity of longitudinal wave /(m·s$^{-1}$) | Wave-impedance of material /($\times 10^5$ g·cm$^{-2}$s$^{-1}$) |
|---|---|---|---|
| Composite | 1.048 | 1686 | 1.767 |
| Wave-absorbed layer | 0.935 | 1631 | 1.525 |
| Atmosphere | $1.21\times 10^{-7}$ | 340 | $4.15\times 10^{-8}$ |

对于纵波而言,由式(1)和式(2)可算出

自由端面时,介质Ⅰ为复合材料,介质Ⅱ为空气:

反射系数　　F = - 0.999

透射系数　　T = 0.001

非自由端面时,介质Ⅰ为复合材料,介质Ⅱ为吸波层材料:

反射系数　　F = - 0.05

透射系数　　T = 0.95

复合材料背板直接与空气接触时,界面处于自由端面的状态,由冲击波的反射系数 F = - 0.999,透射系数 T = 0.001,可以看出,有 99.9 % 的冲击波被反射回复合材料中,在复合材料内部节点处叠加震荡[4],且反射后的冲击波为拉伸波,无论从波的形式和波的强度都会对复合材料背板产生明显的强烈作用。

吸波层材料具有与复合材料较匹配的波阻系数,垂直入射时,冲击波的反射系数 F = - 0.05,透射系数 T = 0.95,与复合材料的自由端面状态相比,反射波减少了 94.9%,大部分冲击波由复合材料直接传播进入吸波层;同时吸波层的衰减系数为3.9 dB/cm,大部分能量可被吸波层消耗掉,只有少量的冲击波能够再次由吸波层进入复合材料。经过吸波层的“过滤”,冲击波的反射振荡叠加效应得到了有效的抑制。

因此吸波层的工作原理是从波阻抗匹配和冲击波能量的衰减两个方面,减弱了冲击波震荡叠加对复合材料中纤维、基体和二者界面的破坏,从而提高了复合材料背材的防弹性能。

## 3　试验结果和分析

在试验过程中,冲击波的能量和破坏作用比试验预想要显著得多,而此时吸波层的采用可以减弱冲击波对装甲防弹性能的影响,使装甲的防弹性能有明显的提高。试验结果如表 2 所示。

由试验结果可以看出,虽然吸波层的厚度只有 2 mm,质量只占装甲整体质量的 10 %,材料本身不具备任何防弹能力,却可以较大幅度的提高复合装甲的防弹性能。但由试验结果还可以看出,吸波层作用的发挥是有一定条件的,只有由 9 层织物组成的极限情况下才有最佳的效果,这说明吸波层需要与复合装甲相互配合,单靠吸波层在任何情况下提高复合装甲的防弹性能是不切实际的。

在另一组试验中,采用厚度为 1.3 mm 的防弹钢板与 9 层织物的复合材料复合,进行 3 组轻型冲锋枪的实弹射击试验,其中第一组无吸波层,第二、三两组采用不同的吸波层位置,其中第二组的主要作用是吸收冲击波中的横波,第三组的作用是吸收

表 2 吸波层对复合装甲防弹性能的影响

Table 2 The influence of the wave-absorbed layer on the ballistic performance of the composite armors

| The layer number of the composite | Without wave-absorbed layer | | With wave-absorbed layer | |
|---|---|---|---|---|
| | The number of penetrated layers | Phenomenon of test | The number of penetrated layers | Phenomenon of test |
| 8 | 8 | penetrate | 8 | penetrate |
| 9 | 9 | penetrate | 3 | embed |
| 10 | 7 | embed | 2 | embed |

纵波。试验结果如图 2。

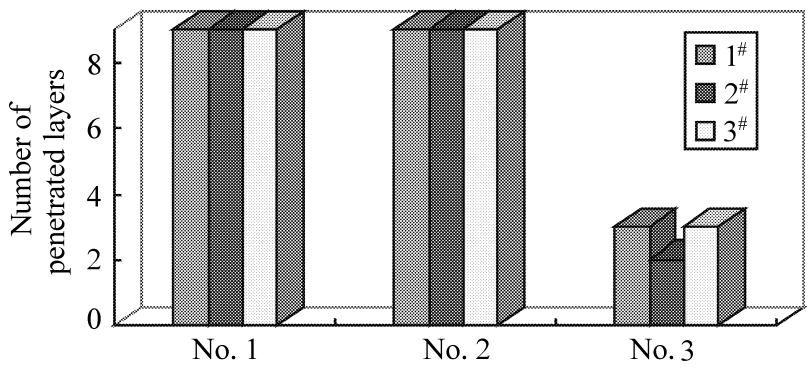


图 2 吸波层试验结果

Fig. 2 The experiment results of the wave-absorbed layer

从试验结果看出,没有吸波层的情况下,复合装甲的防弹性能均较差;吸波层位于复合材料背面,也就是部分纵波被吸收时,复合装甲的防弹性能较好;而吸波层位于复合材料侧面,也就是部分横波被吸收时,复合装甲的防弹性能也较差。

这说明冲击波中纵波的存在对复合装甲的防弹性能有显著的影响,在吸收部分纵波后,可以提高复合装甲的防弹性能;冲击波中横波的存在对复合装甲的防弹性能没有显著的影响,在吸收部分横波后,没有提高复合装甲的防弹性能。

从试验现象看,复合材料中仍有一定的分层现象,吸波层虽然没有完全阻止分层现象的发生,但确实提高了复合材料背材的防弹性能。

纵波之所以对复合装甲有显著的影响,这是因为纵波在传播过程中,通过压缩使复合材料变形增大,纤维因此产生较大的拉伸变形,并且会使此区域内参与防弹的部分复合材料受损;同时若大部分纵波从界面反射背材中,由其反射系数 $F < 0$ 可知,反射波为拉伸波,大量的拉伸波对微粒有着相当大的破坏作用,另一方面由于反射波的震荡叠加会使冲击波本身的振幅增大,也会进一步增加复合材料的破坏。以上的各种原因都引起了复合材料的防弹性能下降,因而弹丸就相对容易地从受损的复合材料中穿过,出现试验中复合装甲被击穿的现象。

在通常情况下,横波的波速相对较慢,波速只有纵波的 1/2 左右,在横波大范围破坏复合材料背材之前,纵波和弹体已经先行对复合材料背材进行了破坏,横波的传播因此而受阻,虽然横波的破坏力很大,但其破坏范围因此而被局限在了一定的范围内,在嵌入和穿透试验中横波的破坏作用相对纵波和弹体来说,已退居第二位。

## 4 结 论

冲击波对复合装甲防弹性能有显著的影响,在弹丸嵌入或穿透防弹装甲的情况下,纵波的存在会使复合装甲容易被弹体击穿,通过吸波层的设计可以削弱冲击波振荡叠加对装甲防弹性能产生的负面影响,从而明显提高复合装甲的防弹性能。

参考文献:

[1] 孙志杰, 张佐光, 沈建明, 等. UD 防弹板工艺参数与弹道性能的初步研究 [J]. 复合材料学报, 2001, 18(2): 46- 50.

[2] Laible R C. Ballistic Material and Penetration Mechanics [M]. Elsevier Scientific Publishing Company, 1980. 185- 199.

[3] 张自强. 装甲防护技术基础 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2000. 159- 160.

[4] Simth J C. Stress-strain relationship in yarns subjected to rapid impact loading [J]. Textile Research Journal, 1960, 10: 752- 760.

责任编辑: 孙丽娟