

# 新型防弹复合材料

郝琛韬

(西安工程大学,陕西 西安 710048)

**摘要:**随着先进技术在军事战争中的应用,人员财产损失的情况越来越复杂,因此对防弹材料也应深入研究与应用,陶瓷装甲与纤维增强复合材料是重要研究应用方向。对新型复合防弹陶瓷板和芳纶防弹复合材料进行概述,对比新型复合防弹陶瓷板与传统防弹板,分析其特点与当前研究应用中仍存在的一些问题;对芳纶防弹复合材料的防弹机理进行详细描述,指出影响芳纶防弹复合材料性能的主要因素。

**关键词:**新型复合陶瓷防弹板;织物结构;芳纶防弹复合材料

中图分类号:TB 33

文献标志码:A

文章编号:1673-0356(2022)04-0010-04

## 1 新型复合陶瓷防弹板

对陶瓷装甲的研究,是防弹复合材料发展应用的重要内容。陶瓷装甲的弹道防护效果比普通的装甲钢更为优越。当前对被动式装甲和反应式装甲的研究和应用最为广泛。在防弹机理上,反应式装甲中装甲材料受到子弹激励后会产生动能,动能反作用于子弹,而被动式装甲通过自身的特性抵御子弹的冲击。如今,美国、俄罗斯等国家已经使用陶瓷和复合材料研究出重量效率更好的装甲系统,并研制出陶瓷面板装甲,而

且已普遍应用<sup>[1-5]</sup>。

### 1.1 防弹机理

当子弹高速撞击复合陶瓷防弹板时,利用作用力与反作用力的原理,使其高速进入防弹板后在内部又以相反的力高速反弹出去,在表面就形成一个近似圆形的弹孔,从而实现了只破坏防弹板表面的目的,而对整体复合防弹板没有致命损伤,从而实现防弹<sup>[6]</sup>。

### 1.2 新型复合陶瓷防弹板性能参数

陶瓷材料的主要特性见表 1<sup>[7]</sup>。

表 1 陶瓷材料特性

特 性	高纯度铝	碳化硅	二硼化钛	碳化硼
体积密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	3.81~3.92	3.09~3.22	4.45~4.52	2.50~2.52
杨氏系数/kMPa	350~390	380~430	520~550	420~460
泊松比	0.22~0.26	0.14~0.18	0.05~0.15	0.14~0.19
韦氏硬度值	1 500~1 900	1 800~2 800	2 100~2 600	2 800~3 400
断裂韧性/(MPa·m <sup>1/2</sup> )	3~5	3~5	5~7	2~3

陶瓷材料具有高比刚度、高比强度和在许多环境下的化学惰性,同时其相对于金属的低密度、高硬度和高抗压强度使其应用更加广泛。高纯度铝的密度较高,硬度和断裂韧性较低,所以其抗弹性能较低;碳化硅陶瓷的结构使其具有高强度、高硬度、耐磨损、耐腐蚀、高热导率等性能;二硼化钛的弹性模量较高;碳化硼具有较高的熔点,硬度和力学性能比较优异,其密度在几种常用陶瓷材料中最低,加上弹性模量较高,使其成为军事装甲和空间领域材料方面的良好选择。

复合材料的主要特性见表 2<sup>[8-10]</sup>。

表 2 复合材料特性

纤维	密度 (g·cm <sup>-3</sup> )	拉伸强度 /MPa	杨氏系数 /kMPa	失效力 /%
E 玻璃	2.60	3 500	72	4.8
凯夫拉	1.45	2 900	120	1.9
硼	1.78	3 400	240	1.4

防弹复合材料除了具有一定的模量外,还要有较好的延伸率、断裂韧性、高比强度并且能在应变率下保持好的性能。E 玻璃的拉伸强度高但韧性较差,而凯夫拉材料密度低、强度高、韧性好、耐高温、易于加工和成型。硼具有低密度、高比强度与较高弹性模量的特点。

### 1.3 新型复合陶瓷防弹板材料特点

新型复合陶瓷防弹板具有传统防弹板不可比拟的

收稿日期:2021-11-16;修回日期:2021-12-02

作者简介:郝琛韬(1997—),男,研究生在读,研究方向:复合材料损伤,E-mail:hao\_chentao@qq.com。

优点,具体对比见表3。

表3 新型复合防弹陶瓷板与传统防弹材料对比

对比项目	传统防弹板	新型复合陶瓷防弹板
使用性	一次性使用,不可修复	修复后可重复使用
结构可设计性	基本上不具有可设计性	可自由设计成曲面等形式
破坏方式	裂纹	近似圆孔
材料成本来源	成本较高	原材料成本低,材料可再生

(1)可承受多发弹打击性能。该材料在同一面上可以同时承受多发弹连续冲击,而不会出现整体破碎的情况,只会在表面形成一个个近似圆形的弹孔,而不影响材料其他部位的防弹效果。

(2)具有良好的结构可设计性。复合陶瓷板可以产生相应角度的弯曲变形,变形后可恢复到原来的形状,可以设计成平面、曲面和斜面等多种形状的复合陶瓷防弹材料。

(3)可修复重复使用。当遭受弹击后,表面的圆形弹孔可以用陶瓷防弹体填入,使用防弹胶液重新复合成形,就可以重新达到初始材料的性能<sup>[7]</sup>。

(4)使用可靠性高。该材料综合使用高性能陶瓷板、UHMWPE板及TC4板的防弹特性,使得防弹性能优于单体材料,能有效阻击各种规格手枪及相关中小型口径穿燃弹。

(5)技术成熟度高,具有很强的可设计性。该材料已经具备了相当成熟的生产工艺,能够根据实际需要,进行个性化需求设计,以满足不同的防弹需要。

#### 1.4 当前防弹复合材料存在的问题

由于防弹复合材料是由多种材料复合而成的,因此,复合材料的不均匀性、各向异性、本构关系复杂、破坏机理复杂和强度准则复杂等,是复合材料及其结构的主要力学特点,从而增加了复合材料及其结构、防护机理的分析、计算、测试和设计的复杂性难度,截至目前,防弹复合材料仍存在以下问题<sup>[11]</sup>。

(1)吸收能量不够。防弹材料在使用时未吸收的能量会使人员财产造成损失,武器的破坏杀伤力也随着武器的升级而越来越大,所以今后的研究应用要着重在这方面提高材料的防弹性能和安全性。

(2)重量不够轻。防弹复合材料的重量是能否推广使用的一个重要因素,所以应在保证良好的防弹性的前提下,尽可能地减轻防弹复合材料的重量。

(3)强化和增韧矛盾。特别对防弹陶瓷复合材料,这一矛盾也往往难以克服。在防弹复合材料中加入某些增韧材料可能会降低材料的强度,但是若增加材料

的强度,则有可能降低材料的韧度,所以要经过多次试验寻找防弹材料最合适的强度和韧度<sup>[12]</sup>。

(4)关于复合材料的相容性方面,包括物理、化学、力学等材料特点,使复合材料能融合各个特点起到更好的防护作用。

此外,还有界面和价格等方面的问题,也没有得到完全彻底的解决。

## 2 芳纶防弹复合材料

### 2.1 防弹机理

纤维防弹材料在受到冲击能量时,会使其发生拉伸与形变,纤维吸收的能量会变成其形变所需的功,其拉伸形变断裂所需的功为断裂能,也称为断裂功,纤维的断裂能与参与拉伸形变断裂的纤维数量有关。衡量纤维防弹性能的参数是纤维的能量吸收率(单位质量纤维的断裂能)<sup>[13]</sup>。

纤维防弹材料在受到外来冲击时,冲击产生的纵向应力会在纤维材料中迅速向四面八方传播,形成“冲击波”(即声波)。纤维防弹材料中的声速会影响能量瞬时扩散,也就决定了参与能量吸收的纤维量,进而影响材料的防弹效果。所以纤维中的声速是影响纤维防弹性能的另一个重要参数<sup>[14]</sup>。

防弹材料中纤维的形态有挺直和弯曲,如果材料纤维的形态是挺直的,那么能量会无反射沿纤维轴向传播,能量会因此快速扩散较远;如果纤维形态是弯曲的,或者纤维中有断头,那么在纤维中的弯曲点或断点会反射部分能量,减小瞬时扩散范围,材料的防弹效果也会随之降低。由此可见纤维二维二向布的防弹效果会因此优于平纹布<sup>[15]</sup>。

能量的传递往往伴随着同一层面内或层面之间纤维之间的接触。而在冲击能量的传递过程中,能量反射发生在所有材料的界面内,情况多样复杂。故冲击能量最有效的传播途径是沿纤维轴向的扩散<sup>[16]</sup>。

### 2.2 影响芳纶防弹复合材料性能的主要因素

防弹复合材料的性能主要受基体材料的模量及含量、纤维材料的性能、纤维的编织方式和工艺的影响。

#### 2.2.1 基体树脂模量对复合材料弹道性能的影响

因为低模量基体树脂的阻尼性能好,有利于能量吸收,因此低模量基体树脂制造的层合板比高模量基体树脂的防弹效果要好<sup>[17]</sup>。

#### 2.2.2 基体树脂含量对复合材料弹道性能的影响

基体树脂含量对复合材料弹道性能有十分重要的

影响,复合材料中纤维体积含量的提高会使其弹道性能提高,但如果纤维体积含量过高会使弹道性能下降。因为在复合材料中基体树脂能够在结构单元中传递应力,但如果纤维体积含量过高会使复合材料中的基体含量过少,导致树脂与纤维和纤维与纤维之间的黏接性能降低,从而影响层压板的整体性,复合材料抗弹性能也会因此下降。纤维体积含量是指该织物中纤维的体积占织物整个体积的百分率,可折算成面密度。面密度是衡量防弹板实际适用性的重要因素,若能满足防护要求,设计应用时面密度应尽量小些,使成本和重量大大降低。

### 2.2.3 层压板面密度对层压板弹道性能的影响

在弹丸侵彻层压板时会有滑裂纤维的趋势,部分纤维会起不到减少弹丸侵彻的作用。若面密度提高,层压板的吸收能会因此变大,说明其防弹性能随面密度的提高而增强,无纬布层压板的弹道性能优于平纹织物层压板<sup>[18]</sup>。

### 2.2.4 纤维织物结构对层压板弹道性能的影响

二维二向布与缎纹和平纹织物相比,因为其加工程度最低,损失的纤维强度最小,织物纤维会以直线平行排列,强度保留值最大。由于纤维间没有直接的重叠点,收缩率基本为零,有效降低了应变波的反射,避免了弹丸撞击时局部点的应力集中,因此二维二向布的破裂吸收能较高<sup>[19]</sup>。由于二维二向布的织物结构较松散,有利于能量的吸收,使其防弹性能最佳。

### 2.2.5 织物层数对层压板弹道性能的影响

低面密度织物的防弹性能更加优秀。复合材料的防弹性能由材料中纤维所用的编织线、织物组织、各层的层数和纤维排列方式决定。给定重量下编织物越薄、越紧密及层数越多材料防弹性能越好,防弹材料在面密度一定时,应考虑采用织物层数多、单面密度较小的织物。同时,提高纤维自身性能也会提高材料的防弹性能<sup>[20]</sup>。

## 3 应用和发展趋势

先进的防弹复合材料具有高比强度、比模量、设计性和通用性,在许多军事应用中不可或缺,它们是设计的基础因素,也是个人防护和先进武器军备的关键技术。因此,对于一个单位而言,如果能进入到该研究应用领域,成为某一类产品的合格供应商,无论从社会效益和经济效益方面考量,都具有十分重大的战略意义。

复合材料具有良好的性能,因为它结合了增强材料和基体各自的优点,也是发展最快、最有前途的防弹材料。防弹材料逐渐向多元化和复合化发展,出现了各种具有高硬度和高韧性的新型防弹材料,来应对更加复杂的防护问题。随着装甲系统轻量化、高效化的发展需求,防弹陶瓷与纤维增强防弹复合材料的优越性愈加凸显,新型复合陶瓷防弹板具有传统防弹板不可比拟的优点,但存在的问题不容忽视,因此着力于解决防弹复合材料存在的问题,不断优化材料性能是当前的研究重点。

### 参考文献:

- [1] 龙浩,尚武林,张二勇,等. 高分子纤维复合防弹材料研究[J]. 纺织报告,2020(1):28-30.
- [2] GROUCH I G. Body armour-New materials,new systems[J]. Defence Technology,2019,15(3):241-253.
- [3] 高原,姚凯. 军用车辆装甲防护材料与技术发展的研究[J]. 机电产品开与创新,2015,28(2):10-13.
- [4] 孙川,万春磊,潘伟,等. 反应烧结  $B_4C/Al_2O_3$  复合陶瓷的装甲防护性能研究[J]. 无机材料学报,2018,33(5):545-549.
- [5] 梓文. 用于复合装甲防护系统的陶瓷[J]. 兵器材料科学与工程,2016,39(1):88.
- [6] 孙娟. 陶瓷复合装甲抗侵彻能力数值模拟[D]. 长沙:中南大学,2011.
- [7] 张文毓. 装甲防护陶瓷材料的研究与应用[J]. 陶瓷,2020(8):16-20.
- [8] 林嘉琦,曹文鑫. 高性能凯夫拉纳米纤维复合材料[C]// 第十届国际(中国)功能材料及应用学术会议,2019.
- [9] 张磊,孙清,王虎长,等. E玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料力学性能试验研究[J]. 电力建设 2010,31(9):118-121.
- [10] 刘照,薛向欣,姜涛,等. 硼及其硼化物的应用现状与研究进展[J]. 材料导报,2006(16):1-4.
- [11] 吴中伟,艾青松,刘元坤,等. 芳纶陶瓷复合材料防弹性能的研究[J]. 中国个体防护装备,2014(4):10-13.
- [12] 王亚进,王陶,王良模,等. 陶瓷/芳纶纤维复合靶板防弹性能研究及结构改进[J]. 北京化工大学学报(自然科学版),2020,47(2):74-80.
- [13] 赵玉梅. 柔性复合防刺服的研究[D]. 上海:东华大学,2005.
- [14] 关新杰. 高性能纤维在防弹衣制造中的应用[J]. 非织造布,2010,18(6):20-22.
- [15] 陈强. 芳纶/酚醛复合材料防弹性能研究[D]. 武汉:武汉

理工大学,2002.

- [16] 吴中伟,张慧,艾青松,等. 芳纶防弹防刺材料研究[J]. 合成纤维,2021,50(6):36-40.
- [17] 胡晓兰,王东,石毓镡,等. 用于人体防护装甲的纤维复合材料的研 究[J]. 纤维复合材料,2000(2):40-44.
- [18] 李英建,金子明,李华,等. 玄武岩纤维增强乙烯基酯树脂的抗弹性能研究[J]. 工程塑料应用,2006(9):5-7.
- [19] 王亚进,王陶,王良模,等. 陶瓷/芳纶纤维复合靶板防弹

性能研究及结构改进[J]. 北京化工大学学报(自然科学版),2020,47(2):74-80.

- [20] LIU B G, WADLEY H, DESHPANDE V S. Failure mechanism maps for ultra-high molecular weight polyethylene fibre composite beams impacted by blunt projectiles [J]. International Journal of Solids and Structures, 2019, (7):178-179.

## New Bulletproof Composite Material

HAO Chentao

(Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** With the application of advanced technology in military warfare, the situation of personnel and property losses is becoming more and more complicated. Therefore, further research and application of ballistic materials should also be conducted. Ceramic armor and fiber reinforced composite materials are important research and application directions. The new composite bulletproof ceramic board and aramid bulletproof composite material were summarized. The new composite bulletproof ceramic board was compared with the traditional bulletproof board, and its characteristics and some problems still existing in the current research and application were analyzed. The bulletproof mechanism of aramid bulletproof composites was described in detail, and the main factors that affect the performance of the aramid bulletproof composite material were pointed out.

**Key words:** new composite ceramic bulletproof board; fabric structure; aramid bulletproof composite material

(上接第 5 页)

- [32] 王震. 甲烷/二氧化碳的吸附法分离[D]. 天津:天津大学, 2005.
- [33] BAI R, YANG M, HU G, et al. A new nano porous nitrogen-doped highly-efficient carbonaceous CO<sub>2</sub> sorbent synthesized with inexpensive urea and petroleum coke[J]. Carbon, 2015, 81(1): 465-473.
- [34] CHEN J, YANG J, HU G, et al. Enhanced CO<sub>2</sub> capture capacity of nitrogen-doped biomass-derived porous carbons [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2016, 4 (3):1439-1445.

[35] 邬良. 木棉及柳絮纤维基生物质多孔碳制备及电化学储能与 CO<sub>2</sub> 捕获的研究[D]. 北京:北京化工大学, 2017.

[36] JALILOV A S, RUAN G, HWANG C C, et al. Asphalt-derived high surface area activated porous carbons for carbon dioxide capture[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(2): 1376-1382.

[37] 单巨川,张梦迪,阴建华,等. 杨树绒毛纤维的吸油性能研究[J]. 棉纺织技术, 2017, 45(12): 14-17.

[38] 魏玉君,夏朝阳,徐丽丽,等. 棉短绒非织造布吸油性能测试与评价[J]. 上海纺织科技, 2018, 46(8): 52-54.

## Research Status and Prospect of Willow Catkin Fiber

FU Weikang, OLIMOV Khamdamjon, LI Wei, JING Yuhan, XI Bojun\*

(College of Textile and Garment, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China)

**Abstract:** Catkins are usually regarded as waste, but their essence is high-quality biomass resources. Based on the microstructure of willow catkin fiber, the research status and application prospect of catkins in electrode material, heavy metal adsorption, nano-aerogels, CO<sub>2</sub> capture and oil absorbing materials were introduced in light of the characteristics of catkins, such as light weight, hollow section, surface wrinkle and many pores.

**Key words:** willow catkin; electrode material; heavy metal adsorption; nano-aerogels