

高性能纤维层叠复合材料的抗冲击性能研究

孔春风^a, 田伟^{a,b}, 翁浦莹^a, 康凌峰^a, 祝成炎^{a,b}

(浙江理工大学, a. 现代纺织加工技术国家工程技术研究中心;

b. 先进纺织材料与制备技术教育部重点实验室, 杭州 310018)

摘要: 制备碳纤平纹机织布(T)、芳纶平纹机织布(K)、玻纤平纹机织布(G)、高强聚乙烯 UD 布(U)增强双酚 A 环氧树脂基酯层叠复合材料, 并对复合材料进行抗冲击性能测试。研究不同种类层叠复合材料的防弹性能以及防弹机理。结果表明: 制备的高性能纤维不同层叠复合材料的抗冲击性能 BPI 值的大小关系是: $UUUU > GUTK > GGKK > TTKK > KKKK > GGGG > TTTT$; 高性能纤维层叠复合材料着弹面纤维织物发生剪切破坏吸收能量, 背弹面纤维织物发生拉伸断裂吸收能量; 高性能纤维层叠复合材料的着弹面应选择抗剪切性能比较好的无机纤维碳纤、玻纤等; 背弹面应选择抗拉伸性能较好的有机纤维芳纶、高强聚乙烯等。

关键词: 玻璃纤维; 碳纤维; 芳纶; 高强聚乙烯; 双酚 A 环氧树脂基酯; 抗冲击性

中图分类号: V258 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-3851(2016)03-0367-05 **引用页码:** 050204

0 引言

高性能纤维树脂基复合材料是一种将各种高性能纤维(玻纤、碳纤、芳纶、高强聚乙烯等)作为增强体置于基体材料复合而成的一类性能特殊、抗弹道冲击性能优异的复合材料^[1-2]。其增强树脂主要有热固性树脂、热塑性树脂、水溶性树脂等^[3]。防弹复合材料的主要原理就是利用碳纤维、高强玻纤等抗剪切性能以及芳纶、高强聚乙烯的抗拉伸和伸长率高的优势吸收子弹的动能, 从而达到防弹的目的。Haiell 等^[4]研究发现高性能纤维树脂基复合材料在弹道冲击下, 复合材料着弹面几层纤维发生压缩和横向剪切破坏, 背弹面几层纤维发生拉伸破坏。Mines 等^[5]研究了复合材料在弹道冲击过程中能量损耗分配问题, 认为子弹动能损耗的方式主要有贯穿局部复合材料的吸能、复合材料的分层过程吸能、子弹和复合材料之间的摩擦吸能、复合材料的变形吸能。

防弹复合材料向着多元化和功能化方向发展, 为了实现多层混杂复合材料的轻质、抗冲击性能好和高性价比, 本文设计了相关实验, 探究了不同纤维增强复合材料的层叠效应, 并探究以此为增强材料的复合材料在弹道冲击条件下的能量吸收性能。

1 实验

1.1 实验材料与仪器

实验材料: 芳纶平纹机织布(美国杜邦公司, 面密度 0.988 kg/m^2)、玻璃纤维平纹机织布(南京玻璃纤维研究设计院, 面密度 0.936 kg/m^2)、碳纤维平纹机织布(日本东丽公司, 面密度 2.069 kg/m^2)、高强聚乙烯 UD 布(宁波大成新材料股份有限公司, 面密度 0.690 kg/m^2); 双酚 A 环氧树脂基酯 879 树脂(上海富晨化工有限公司), 其中固化剂是环烷酸钴(上海富晨化工有限公司), 促进剂是过氧化甲乙酮(上海富晨化工有限公司)。

实验仪器: 真空泵(深圳市鼎鑫宜实验设备有限

收稿日期: 2015-07-02

基金项目: 国家国际科技合作专项项目(2011DFB51570); 浙江省国际科技合作专项项目(2012C24013); 浙江理工大学学院科创项目(2015XSKY33); 浙江理工大学研究生创新研究项目(11110032481408)

作者简介: 孔春风(1990-), 女, 河南商丘人, 硕士研究生, 主要从事复合材料方面的研究。

通信作者: 田伟, E-mail: tianwei_zstu@126.com

公司,2XZ-4B)、气控高速发射装置(中国兵工集团第53研究所)、场发射扫描电镜(Carl Zeiss SMT Pte Ltd,ULTRA55)。

1.2.1 层叠复合材料的制备

选取玻璃纤维平纹机织布、碳纤维平纹机织布、芳纶平纹机织布、高强聚乙烯 UD 布作为增强材料,双酚 A 环氧树脂基酯 879 作为基体,采用真空灌注

工艺制备了七种材料体系的层叠复合材料,层叠复合材料的尺寸为 $200 \times 200 \text{ mm}$ 。

层叠复合材料的制备采用的是真空灌注工艺^[6]。其中真空灌注工艺的树脂溶液是将双酚 A 环氧树脂基酯、促进剂、固化剂的质量比例按照 $100:2:1.5$ 配置。层叠复合材料的制备工艺流程如图 1 所示。其制备的层叠复合材料的树脂含量如表 1 所示。

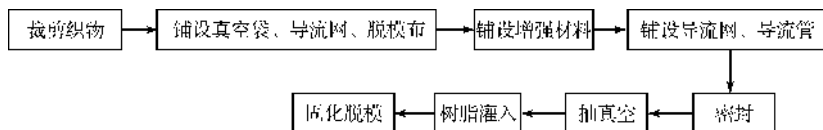


图1 层叠复合材料的制备工艺流程图

表1 层叠复合材料的铺层方式

编号	1	2	3	4	5	6	8
复合材料的层叠顺序	GGGG	TTTT	KKKK	UUUU	GGKK	TTKK	GUTK
单位体积复合材料的树脂含量/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.73	1.06	1.03	0.24	1.83	1.67	1.60

注:样品 GGGG 为 4 层玻纤平纹复合材料,样品 TTTT 为 4 层碳纤平纹复合材料,样品 KKKK 为 4 层芳纶平纹复合材料,样品 UUUU 为 4 层高强聚乙烯 UD 布,样品 GGKK 为 2 层玻纤平纹布在前 2 层芳纶平纹布在后的 4 层复合材料,TTKK 为 2 层碳纤平纹布在前,2 层芳纶平纹布在后的 4 层复合材料,GTUK 为各种纤维的 4 层复合材料。

1.2.2 层叠复合材料抗冲击性能测试

纤维层叠复合材料的抗冲击性能测试以氮气为

动力,在口径为 7.62 mm 的 53 式气控高速发射装置(浙江理工大学)上完成,其设备原理如图 2 所示。

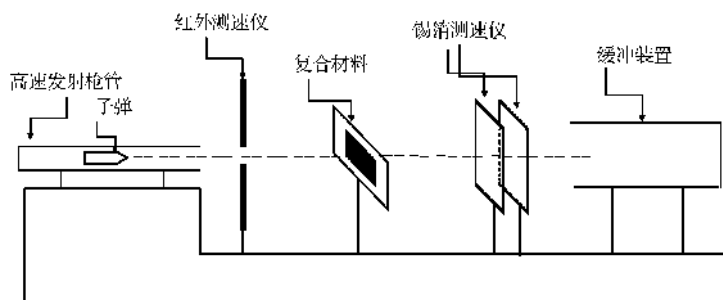


图2 高速气控发射装置

抗冲击测试采用的子弹是钢制弹体,质量为 5.6 g ,弹体头部呈圆锥形,锥角为 30° ^[7]。弹体的初速度通过控制氮气的压力调整,使用红外大靶面光幕靶测速系统测试时间从而根据距离计算出初速度,弹体的末速度通过两个锡箔纸靶板来测试末速度,然后根据两个锡箔纸的距离来得到末速度的大小。将复合材料裁剪成 $175 \text{ mm} \times 175 \text{ mm}$,通过子弹在通过复合材料前和通过复合材料后的速度计算

出层叠复合材料吸收子弹的动能,然后换算出复合材料单位面密度吸收能量,进而得出复合材料的抗冲击性能 BPI 和弹道性能指数 V_{50} 的值^[8]。

2 结果与讨论

2.1 层叠复合材料破坏形貌

如图 3 给出了无机纤维玻纤、碳纤层叠复合材料受到冲击后着弹面和背弹面的整体照片。

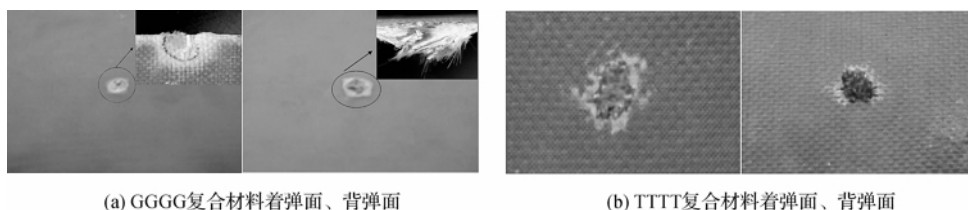


图3 无机纤维层叠复合材料的破坏形貌

当子弹开始作用于复合材料时,首先子弹压缩复合材料使其产生变形,随着子弹的侵彻,复合材料的变形越来越严重,随后会使复合材料的纤维织物与树脂脱粘、分层。从图3中GGGG、TTTT复合材料的弹孔处纤维的断裂可以看到,弹孔附近纤维断裂呈现较小范围的脆性断裂,层层之间没有明显

的分层现象,复合材料的背弹面由于纤维与子弹的摩擦和子弹对纤维的充塞积压,导致背弹面呈现出纤维的凸起。

图4给出了有机纤维芳纶、高强聚乙烯和有机纤维无机纤维混叠的层叠复合材料受到冲击后着弹面和背弹面的整体照片。

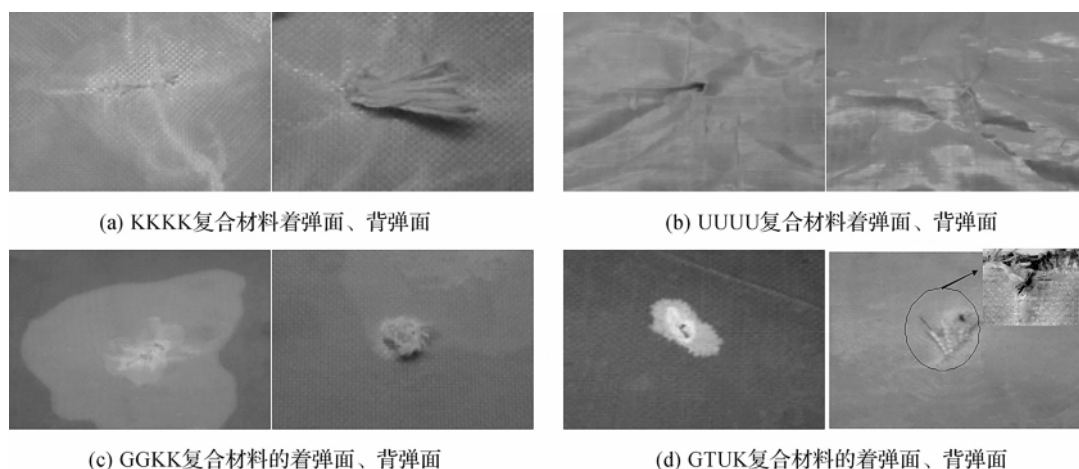


图4 有机纤维层叠及有机无机混叠复合材料的破坏形貌

从GUTK复合材料的弹孔处纤维断裂可以看出,着弹面出现了沿纵横方向扩展的裂纹,主要是充塞侵彻破坏,扰动半径相对较小;而复合材料的背弹面出现了放射状的裂纹,破坏面积较大,裂纹沿纵横方向扩展较多,复合材料的纤维织物主要是拉伸断裂,扰动区半径较大,有非常明显的鼓包和分层现象。着弹面弹孔基本为圆形,孔内纤维断头相对比较整齐,而背弹面无明显的弹孔,而是长短不一的纤维断裂抽拔。从GGKK的复合材料板材的弹道侵彻中可以看到,子弹冲击之后,复合材料的冲击面有大面积的白色区域,说明复合材料的纤维织物已经和树脂脱粘,出现了分层现象,而背弹面是芳纶纤维出现了比较明显的抽拔和断裂。

2.2 复合材料的抗冲击性能

2.2.1 不同种类复合材料的弹道极限速度 V_{50}

弹道极限速度 V_{50} 是子弹侵彻被测复合材料贯穿概率为50%时的入射速度,即是“临界穿透速度”^[9]。依据文献采用近似计算的方法,弹道极限速度的计算公式如下:

$$V_{50} = \sqrt{V_0^2 - V_1^2} \quad (1)$$

其中: V_0 为子弹的初速度; V_1 为子弹的末速度。^[10] GGGG、TTTT、KKKK、UUUU、GGKK、TTKK、GUTK复合材料的测试三次弹道极限速度 V_{50} 的平均值,如图5所示。

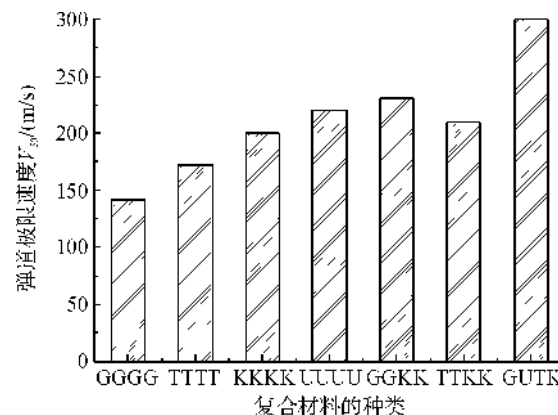


图5 不同复合材料的弹道极限速度 V_{50}

从图5中可以看出:其中GUTK的 V_{50} 值最高,其次是GGKK、UUUU、GGGG、TTTT复合材料弹道冲击速度 V_{50} 最小,不同材料混叠的复合材料的弹道极限速度相对较大一些,即不同材料混叠能发挥协同效应,增大了临界穿透速度。对于同种材料的混叠复合材料,弹道极限速度 V_{50} 的大小是:UUUU > KKKK > TTTT > GGGG,说明有机纤维芳纶、高强聚乙烯混叠复合材料的弹道极限速度要高于无机纤维碳纤维、玻璃纤维混叠复合材料。

2.2.2 不同种类复合材料的抗冲击性能 BPI

复合材料的层合板在受到子弹冲击后,子弹动能的一部分转变成复合材料的树脂和板材的烧蚀,另一部分转变成复合材料在冲击过程中,复合材料的纤维断裂、纤维从树脂中拔出,树脂破碎以及复合

材料分层的能量^[11]。如果在这个过程中吸收能量的总和小于子弹的冲击能量,则复合板材被穿透,否则复合材料板材能起到有效的防护作用。每种复合材料弹道冲击三次,图6所示为弹道性能指数 BPI 的平均值。

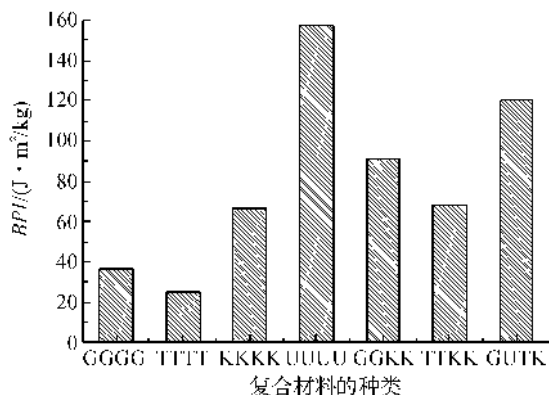
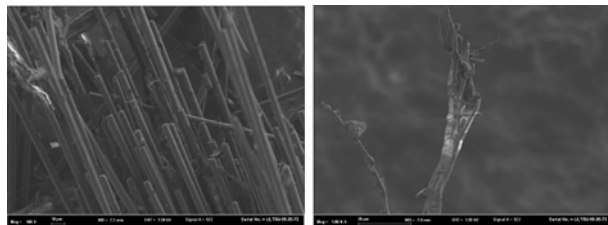


图6 不同复合材料的抗冲击性能 BPI 平均值

从图6可以看出,七种不同的复合材料均被子弹击穿,其中 BPI 大小的排序依次是 $UUUU > GUTK > GGKK > TTKK > KKKK > GGGG > TTTT$,就单一复合材料的抗冲击性能 BPI 而言,玻璃纤维复合材料的 BPI 略大于碳纤维复合材料,而芳纶复合材料的抗冲击性能的 BPI 高于芳纶复合材料。高强聚乙烯UD布复合材料的 BPI 最大,为 $157.135 J \cdot m^2 / kg$ 。在单一玻璃纤维、碳纤维复合材料中引入芳纶后 BPI 有很大提升,玻璃纤维引入芳纶后 BPI 提升了 60.30%,碳纤维引入芳纶后 BPI 提升了 62.88%。在此基础上,将四种增强材料进行层层厚度方向的铺叠,其抗冲击性能的 BPI 也会相应提高。GGGG、TTTT 属于无机非金属材料,其复合材料在受到弹道冲击后,在有限层纤维发生脆性断裂,复合材料剪切变形,弹体穿透后,复合材料仍为一整体,无明显分层和脱层现象,由于纤维变形较小,所以其复合材料吸能不高,其 GGGG、TTTT 复合材料的 BPI 分别为 36.207 、 $25.25 J \cdot m^2 / kg$ 。KKKK、UUUU 复合材料是一种新型高科技有机合成纤维,其复合材料在受到子弹冲击后,拉伸变形性能较好,子弹在穿越复合材料的同时,使复合材料产生凸起,变形的复合材料层间会发生分离,复合材料的这种破坏模式吸收能量较高,其 KKKK、UUUU 复合材料的 BPI 分别为 66.096 、 $157.135 J \cdot m^2 / kg$ 。GGKK、TTKK、GTUK 的复合材料无机纤维织物在着弹面,有机纤维在背弹面,当子弹作用于复合材料时,复合材料着弹点处受到了剪切力作用,先产生剪切破坏,然后复合材料是受到子弹的挤压摩擦产

生拉伸变形,随着复合材料受到子弹的进一步拉伸,复合材料中的纤维变形超过了它的断裂伸长率而发生断裂,从而使复合材料的背弹面产生一个鼓包。对于 GGKK、TTKK、GTUK 的混叠复合材料,当子弹沿厚度方向穿击时,复合材料的织物层间产生撕裂,使复合材料产生分层的现象,这一过程吸收部分冲击能量。GGKK、TTKK、GTUK 的复合材料的 BPI 分别为 91.21 、 68.023 、 $120.502 J \cdot m^2 / kg$ 。



(a) GGKK层叠复合材料(着弹面) (b) GGKK层叠复合材料(背弹面)

图7 层叠复合材料的弹道侵彻弹孔纤维破坏形貌 SEM图

2.3 层叠复合材料的弹道吸能机理

将层叠复合材料板材的弹孔切开,可以看到弹孔处的纤维是冲击断裂,而弹孔边缘处的纤维是弯曲变形或是弯曲折断。纤维复合板产生层与层之间脱粘,只是局部分层破坏,越靠近弹孔底部,层叠复合材料局部发生弯曲变形、纤维受拉力层间剪切力作用越大,复合材料分层越明显。由图7为层叠复合材料弹道冲击破坏形貌 SEM图。其中图7(a)所示,GGKK层叠复合材料在受到弹道冲击过后着弹面玻璃纤维为脆性剪切破坏,纤维受到子弹很大的挤压压缩作用,断裂面相对较为整齐;图7(b)所示,GGKK层叠复合材料受到弹道冲击后背弹芳纶纤维受到拉伸作用,一根根纤维分散开来,纤维上面的树脂也分裂,纤维产生分叉,发生韧性断裂,断裂面粗糙不整齐。

3 结 论

通过对不同种类层叠复合材料的制备与抗冲击性能的研究可知,高强聚乙烯复合材料具有更好的防弹能力,更具有产业化发展趋势,达到轻质、大幅度提高防弹性能的优势。碳纤、玻纤、芳纶、高强聚乙烯不同增强材料的混叠可以大大提高复合材料的防弹性能,起到协同增强效应。综上所述,在本研究的条件下,可以得出下面结论:

a) 层叠复合材料的增强材料层与层的混叠作用很大程度上提高了复合材料的弹道极限速度。其不同层叠复合材料 V_{50} 值的关系是: $GUTK > GGKK >$

UUUU > TTKK > KKKK > TTTT > GGGG。

b) 高强聚乙烯复合材料的防弹性能明显优于碳纤维、玻纤、芳纶复合材料。不同增强材料的混杂使其复合材料的防弹性能有很明显的提高。其不同层叠复合材料的抗冲击性能 *BPI* 大小的关系是: UUUU > GUTK > GGKK > TTKK > KKKK > GGGG > TTTT。

c) 层叠复合材料的复合材料着弹面应选择抗剪切性能比较好的无机纤维碳纤、玻纤等, 背弹面应选择抗拉伸性能较好的有机纤维芳纶、高强聚乙烯等。

参考文献:

- [1] 柴晓明, 肖露, 程建芳, 等. 混杂防弹复合材料的结构优化及弹道机理分析[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2015, 41(2): 148-154.
- [2] 吴中伟, 吕攀珂, 高沛, 等. 热固性树脂对芳纶复合材料防弹性能的影响[J]. 中国个体防护装备, 2012(1): 18-20.
- [3] 易凯, 耿东兵, 杨智勇, 等. 树脂含量对 F-8H3/602 芳纶复合材料性能的影响[J]. 宇航材料工艺, 2015(2): 59-63.
- [4] HAIELL P J, APPLEBY-JHOMAS G J. The impact of structural composit materials, part1: ballistic impact [J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2012, 47(7): 396-405.
- [5] MINES R A W, ROACH A M, JONES N. High velocity perforation behaviour of polymer composite laminates [J]. International Journal of Impact Engineering, 1999, 22(6): 561-588.
- [6] 孙佳英, 李艳清, 章斐燕, 等. 纺织结构复合材料铺层顺序设计与力学性能分析[J]. 浙江理工大学学报, 2013, 30(1): 27-30.
- [7] 马丕波, 蒋高明, 高哲, 等. 纺织结构复合材料冲击拉伸研究进展[J]. 力学进展, 2013, 43(3): 329-357.
- [8] CANTWELL W J, MORTON J. The impact resistance of composite materials-a review[J]. Composites, 1991, 22(5): 347-362.
- [9] 张佐光, 沈建明, 孙志杰, 等. 航空用防弹复合材料弹道极限速度的估算[J]. 航空学报, 2000, 21(S): 90-95.
- [10] 彭刚, 王梅, 冯家臣, 等. 弹道极限速度 V_{50} 在材料抗弹性能评价中的应用研究[J]. 警察技术, 2011(2): 12-15.
- [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.

Impact Resistance of High-Performance Fiber Laminated Composite Materials

KONG Chunfeng^a, TIAN Wei^{a,b}, WENG Puying^a, KANG Lingfeng^a, ZHU Chengyan^{a,b}

(a. Modern Textile Processing Technology National Engineering Research Center;

b. Key Laboratory of Advanced Textile Materials and Manufacturing Technology, Ministry of Education, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The bisphenol A (BPA) epoxy vinyl ester resins laminated composites reinforced with Carbon plain woven cloth (T), kevlar plain woven cloth (K), glass fiber plain woven cloth (G), high-strength polyethylene UD cloth (U) were prepared. Then, a test for impact resistance of the composites was conducted. The bulletproof performance and mechanism of different laminated composites were studied. As shown in the result, the size relation of impact resistance *BPI* value of high-performance fiber laminated composites is as follows: UUUU > GUTK > GGKK > TTKK > KKKK > GGGG > TTTT. The fabric on playing surface of the high-performance fiber laminated composite absorbs energy in case of shear failure while the fabric on back playing surface of the high-performance fiber laminated composite absorbs energy in case of tensile fracture. Inorganic fibers such as carbon fiber and glass fiber with good shear resistance shall be selected as reinforcements of playing surface of high-performance fiber laminated composites. Organic fibers such as Kevlar and high-strength polyethylene shall be selected as reinforcements of back playing surface of high-performance fiber laminated composites.

Key words: glass fiber; carbon fiber; Kevlar; high-strength polyethylene; bisphenol A epoxy vinyl ester; impact resistance

(责任编辑: 张祖尧)