

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2013.04.005

PBO 纤维复合材料抗弹性能研究

宫平,段剑,虢忠仁,张鹏,杨英清,金子明,曲志敏,钟蔚华

(1. 中国兵器工业集团第五三研究所,济南 250031; 2. 山东省高效抗冲击防护材料与制品工程技术研究中心,济南 250031)

摘要:采用铺层模压的方式制备了聚对苯撑苯并二恶唑 (PBO) 纤维织物增强复合材料,并研究了其防弹特性。通过大量实弹试验,分析了不同树脂基体、不同纤维含量、不同铺层方式等因素对 PBO 纤维复合材料抗弹性能的影响。结果表明,采用 EVAC 胶膜作为树脂基体,PBO 纤维体积分数在 70%~80% 时,其复合材料的抗弹性能最佳。

关键词:PBO 纤维;复合材料;抗弹性能;比吸能性

中图分类号:TQ327.8 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2013)04-0021-04

Study on Anti-Bullet Properties of PBO Fabrics Composites

Gong Ping, Duan Jian, Gong Zhongren, Zhang Peng, Yang Yingqing, Jin Ziming, Qu Zhimin, Zhong Weihua

(1. CNGC Institute 53, Jinan 250031, China;

2. Shangdong Province Technology Research Center of High Impact Resistant Protective Materials and Products Engineering, Jinan 250031, China)

Abstract: The composites reinforced by PBO fabrics were prepared by plying and molding, and the ballistic performance of composites was studied. Through lots of ballistic impact experiments, the effect of the resin system, fabrics content and layer mode on the ballistic properties of composites was discussed. The results show that the volume fraction of PBO fiber is in the range of 70% to 80%, and EVAC film as a resin matrix, ballistic performance of PBO composites is the best.

Keywords: PBO fiber; composites; ballistic properties; specific energy absorption resistance

随着世界航空航天、武器装备和其它尖端科技的快速发展,以高强度、高模量、耐高温、阻燃为特征,具有战略意义的高性能纤维得到了各国的重视。欧美日等发达国家对高性能纤维的研究起步早,产业化规模大,以芳纶、碳纤维为代表的高性能纤维的应用,极大地提高了这些国家的国防、科技、经济竞争力。与此同时,强大的经济支撑他们继续开展性能更加优良的高性能纤维的研究,聚对苯撑苯并二恶唑 (PBO) 纤维便是其中的翘楚^[1-2]。

PBO 纤维是 20 世纪 90 年代出现的第三代高性能有机纤维,它具有优异的物理、力学和化学性能,其强度、弹性模量为芳纶纤维的两倍,是钢的 10 倍以上,并具有很好的耐热性能。用 PBO 纤维制成的复合材料的抗冲击性能极为优异,其冲击最大载荷和能量吸收率均远高于芳纶复合材料,因而在抗弹领域具有广阔应用前景。笔者通过对 PBO 纤维复合材料力学性能和抗弹性能的研究,分析了影响其抗弹性能的几点因素。

1 实验部分

1.1 原材料

ZYLON AS 纤维: 纤度 1670 dtex, 日本东洋纺

公司;

ZYLON HM 纤维: 纤度 273 dtex, 日本东洋纺公司;

TWARON 2000 纤维: 纤度 1680 dtex, 荷兰阿克苏公司;

PBO 平纹布: ZYLON HM 1090 dtex 纤维, 面密度 227 g/m², 东华大学;

PBO 单向布: ZYLON AS 1090 dtex 纤维, 面密度 124 g/m², 东华大学;

芳纶平纹布: CT736 织物, 面密度 410 g/m², 荷兰阿克苏公司;

经编布、无纬布: 自制;

聚乙烯 (PE) 膜: 厚 0.017 mm, 济南三塑集团;

乙烯-乙酸乙烯酯 (EVAC) 胶膜: 厚度 0.015 mm, 0.025 mm, 自制;

聚氨酯胶: T-80 树脂、R-300 固化剂, 济南泰和树脂有限公司;

乙烯基酯树脂: SWANCOR905-2 溴化阻燃型

联系人: 宫平, 高级工程师, 主要从事纤维增强复合材料工艺研究

收稿日期: 2013-02-06

树脂,上海上纬公司;

固化剂:异丙苯过氧化氢,天津阿克苏过氧化
物有限公司;

促进剂:环烷酸钴,淄川鲁峰精细化工厂。

1.2 仪器及设备

高压水切割机:NC 4020 型,瑞典 WJ 公司;

微机控制电子万能试验机:5969 型,美国英斯
特朗公司;

测速系统(光幕靶及六通道电子计时仪):西
安工业学院;

扫描电子显微镜(SEM):QUANTA 200 型,美
国 FEI 公司。

1.3 试样制备

PBO 纤维复合材料试样制备工艺如图 1 所示。

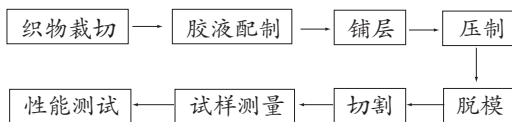


图 1 PBO 纤维复合材料制备工艺流程

1.4 性能测试

(1) 力学性能测试

复合材料拉伸性能按 GB/T 1447-1982 测试。

(2) 弹道性能测试

本试验采用模拟试验方法进行,具体条件为:

①弹种:4.5 g 钢珠碎片模拟弹;

②枪型:12.7 mm 测速弹道枪;

③射击距离:10 m;

④环境温度:25℃;

⑤复合材料板尺寸:300 mm×300 mm。

(3) 抗弹性能评价方法

本试验以 V_{50} 值和比吸能性(SEA 值)作为弹
道性能的评价方法。所谓 V_{50} 值理论上是弹丸体积
的 50% 穿透靶板,50% 留在靶板里时的速度。在纤
维复合材料板厚度和倾角保持不变的情况下,通过
改变发射药量来改变弹丸速度以确定纤维复合材料
板的临界击穿值。随着弹速的增加,弹丸由对靶板
的部分侵彻(临测靶板未被击穿)到完全侵彻(临
测靶板被击穿),以最低的完全侵彻速度和最高的
部分侵彻速度的平均值定为 50% 穿透速度,即弹道
极限速度^[3]。SEA 值的计算公式如下:

$$SEA = (1/2 \times m \times V_{50}^2) / S \quad (1)$$

式中: m ——弹丸质量,kg;

V_{50} ——弹道极限穿透速度,m/s;

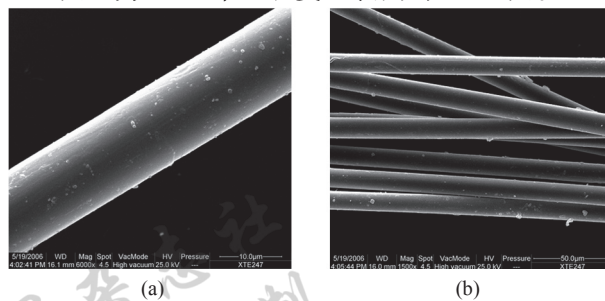
S ——纤维复合材料板的面密度,kg/m²。

2 结果与讨论

2.1 基体树脂对抗弹性能的影响

在纤维复合材料中,基体树脂对纤维起着连
接、支撑和约束的作用。纤维与基体树脂相互作用、
相互依赖,一方面通过基体材料的完整性,在受载状
态下,通过基体将负荷向材料各处传播承载;另一
方面,基体材料与纤维的匹配性直接影响到纤维作
用的发挥。

图 2 为 PBO 单丝和复丝表面的 SEM 图。



a—PBO 单丝表面; b—PBO 复丝表面

图 2 PBO 单丝和复丝表面的 SEM 图

如图 2 所示,PBO 纤维表面比较光滑,与树脂
基体的粘合性较差,因此选择合适的树脂基体对
PBO 纤维复合材料的抗弹性能具有较大的影响。

本试验采用不同种类的基体树脂制备成 PBO
纤维复合材料板,分析基体树脂性能对其抗弹性能
的影响。表 1 中 PBO 纤维复合材料板制备的复合
工艺条件基本相同,只是成型温度略有差异,但对试
验结果并无太大影响。

表 1 不同树脂基体对 PBO 复合材料靶板抗弹性能的影响

树脂基体	SEA 值/(J·m ² ·kg ⁻¹)	结构强度及抗多发弹能力
PE 膜	72.4~75.0	较好
EVAC 胶膜	79.7~85.1	优于 PE 膜
聚氨酯胶	56.7~64.3	最佳
乙烯基酯树脂	≤20	最差

从表 1 可以看出,4 种方案中,采用聚氨酯胶的
方案虽然获得了最佳的结构强度,但其抗弹性能较
低;而 EVAC 胶膜抗弹性能与结构性能均较好,并
且此基体具有良好的工艺性能,操作方便,因此选
则 EVAC 胶膜作为 PBO 复合材料的基体树脂。

2.2 PBO 纤维对抗弹性能的影响

(1) PBO 纤维型号对抗弹性能的影响。

目前,工业化生产的 PBO 纤维可分为 ZYLON
AS 粗纺纤维和 ZYLON HM 高模纤维两类,其中
ZYLON HM 高模纤维是由 ZYLON AS 粗纺纤维
在 600℃ 以上高温热处理后制得,其强度与 ZYLON

AS 基本相同,而在弹性模量上有较大提高。因此,对 ZYLON AS, ZYLON HM 两类纤维进行力学性能测试,测试标准 GB/T 1997.5-2005,结果见表 2。

表 2 ZYLON AS 型、HM 型纤维力学性能

项目	ZYLON AS 型	ZYLON HM 型
断裂强度 / (cN · dtex ⁻¹)	23.8	24.8
拉伸弹性模量 / (cN · dtex ⁻¹)	1980	2730
断裂伸长率 / %	2.98	2.10

从表 2 可以看出, ZYLON HM 型纤维的力学性能更为优越,其弹性模量较 ZYLON AS 型纤维提高约 38%。在此基础上,将 ZYLON AS、ZYLON HM 型纤维分别编织为单向布织物,采用 EVAC 树脂基体,经热压工艺制备复合材料靶板并进行防碎片性能对比测试,结果见表 3。

表 3 ZYLON AS 型与 HM 型纤维复合材料靶板防碎片性能

靶板	厚度 / mm	V_{50} / (m · s ⁻¹)	SEA 值 / (J · m ² · kg ⁻¹)
ZYLON AS 纤维靶板	4.3	442.5	76.9
ZYLON HM 纤维靶板	4.2	456.7	82.2

由表 3 可以看出, ZYLON HM 纤维复合材料的抗弹性能高于 ZYLON AS 纤维复合材料,提高约 6.9%。由于 ZYLON HM 纤维的价格与 ZYLON AS 纤维相近,因此选择 ZYLON HM 纤维作为 PBO 复合材料的增强纤维。

(2)PBO 纤维编织方式对抗弹性能的影响。

PBO 纤维的编织结构对于其复合材料制品的抗弹性能与结构性能均有较大影响,合理的选择编织结构可以最大限度地发挥复合材料的各项性能,提高其抗弹性能,以利于复合材料受到载荷或弹丸冲击使得能量传递,避免材料局部过早受到破坏。分别采用单向布、平纹布、经编布、无纬布四种织物结构编织方式,进行了抗弹性能试验,结果见表 4。

表 4 不同编织结构的 PBO 复合材料抗弹性能

织物	厚度 / mm	面密度 / (g · m ⁻²)	V_{50} / (m · s ⁻¹)	SEA 值 / (J · m ² · kg ⁻¹)
单向布	4.2	5.71	456.7	82.2
平纹布	4.2	5.72	429.0	72.4
经编布	4.3	5.72	436.2	74.8
无纬布	4.1	5.69	463.9	85.1

从表 4 可以看出,抗弹性能 (SEA 值) 优劣顺序依次是: 无纬布 > 单向布 > 经编布 > 平纹布,即无纬布的抗弹性能最佳。但是经编布的工艺性能良好,对于制备形状较复杂并且抗弹性能要求不是太高的制品更具优势。

(3)PBO 纤维铺层方式对抗弹性能的影响。

相对于复合材料而言,其纤维方向和非纤维方向的力学性能相差较大,因而铺层方式的确定对于材料的结构性能具有较大的影响。并且,尽量提高

纤维的强度,是提高其复合材料防弹性能最有效、最关键的途径之一^[4]。因此合理的铺层方式可以最大限度地发挥纤维的强度作用。表 5 表述了 45° 和 90° 方向两种不同纤维铺层方式的复合材料力学性能和抗弹性能。

表 5 不同铺层方式的 PBO 复合材料性能¹⁾

序号	铺层方式	拉伸强度 / MPa	拉伸弹性模量 / GPa	SEA 值 / (J · m ² · kg ⁻¹)
A-1	0° / 90°	810.0	57.5	85.1
A-2	0° / 45°	394.5	26.8	83.8
B-1	0° / 90°	776.7	55.3	82.2
B-2	0° / 45°	369.2	23.4	81.0

注: 1) A-1 和 A-2 为 PBO 纤维无纬布; B-1 和 B-2 为 PBO 纤维单向布。

由表 5 可知,铺层方式为 0° / 90° 的 PBO 复合材料的拉伸强度是 0° / 45° 铺层方式的 PBO 复合材料 2 倍以上;铺层方式对 PBO 复合材料板材的抗弹性能影响不大。但在设计结构抗弹复合材料制品时,不仅要关注其抗弹性能,还要考虑制品的整体刚性,以保障抗弹复合材料制品使用的可靠性。

(4) 纤维体积分数对抗弹性能的影响。

纤维是复合材料的增强相,基体树脂是相对较弱相,所以在复合材料设计中并不希望基体树脂的体积分数过高 (即纤维体积分数过低),但是基体树脂体积分数也必须能使纤维构成整体,并满足复合材料性能要求。笔者对不同纤维体积分数的 PBO 复合材料板进行了测试,试验结果见图 3。

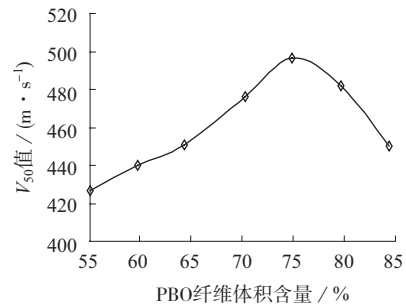


图 3 PBO 纤维体积含量对复合材料 V_{50} 值影响

当 PBO 纤维体积分数大于 85% 后,其复合材料靶板出现严重的分层现象,导致试验无法继续,因此不能获得有效数据。由图 3 可知,当 PBO 纤维体积分数在 70%~80% 时,复合材料的抗弹性能较佳。

3 结论

(1) 采用 EVAC 胶膜为基体树脂制备的 PBO 纤维复合材料的抗弹性能较佳,并且具有较好的结构性能。

(2) 目前工业化生产的两种规格的 PBO 纤维中, ZYLON HM 型纤维的力学性能更为优越,其

弹性模量较 ZYLON AS 型纤维提高约 38%;同时 ZYLON HM 纤维复合材料的抗弹性能亦高于 ZYLON AS 纤维复合材料,提高约 6.9%。

(3)PBO 纤维织物的编织方式和铺层方式均会对其复合材料的抗弹性能产生一定的影响。

(4)PBO 纤维复合材料中纤维体积分数在 70%~80% 时,其抗弹性能较佳。

参考文献

- [1] 江建明,李光,金俊弘,等.超高性能 PBO 纤维的最新研究进展[J].合成纤维,2008(1):5-9.
Jiang Jianming, Li Guang, Jin Junhong, et al. The latest research developments of the super high performance PBO fiber[J]. Synthetic Fiber In China, 2008,(1):5-9.
- [2] 张鹏,金子明,宫平,等.超高性能 PBO 纤维及复合材料研究概况[J].工程塑料应用,2011,39(10):107-109.
Zhang Peng, Jin Ziming, Gong Ping, et al. Progress of PBO

fiber and its composites[J]. Engineering Plastics Application, 2011,39(10):107-109.

- [3] 曲英章.纤维增强复合板抗碎片模拟弹性能试验方法[J].试验力学,1998(6):8-10.
Qu Yingzhang. Evaluation method for FSP resisting property of fiber reinforced composite plates[J]. Journal of Experimental Mechanics. 1998(6):8-10.
- [4] 夏军佳,卫甘霖,张征定.纤维力学性能与防弹性能的关系[J].纤维复合材料,2004(1):18-20.
Xia Junjia, Wei Ganlin, Zhang Zhengding. The Relationship between fiber mechanical properties and its bulletproof protection[J]. Fiber Composites, 2004(1):18-20.
- [5] 李永国,覃兆平,张晓晶.芳纶复合材料抗弹性能初探[J].玻璃钢/复合材料,1999(1):24-25.
Li Yongguo, Qin Zhaoping, Zhang Xiaojing, et al. Analyze anti-bullet property of kevelar composite[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 1999(1):24-25.

巴斯夫塑料配套奔驰发动机支架

近日,巴斯夫公司宣布,戴姆勒公司的全新 GL 级 SUV 将为六缸柴油发动机配备全球首款塑料发动机支架,而该塑料支架采用了专为高机械负荷优化的巴斯夫高强度特种聚酰胺材料。与之前的铝合金支架相比,塑料支架的声学性质和隔热性能更出色,质量更小,承载力却同样出色。

巴斯夫不同型号 Ultramid 制成的扭力支架已被多家汽车制造商采用。相对于铝合金支架, Ultramid 良好的声学特点是其主要优势之一。得益于塑料特有的阻尼性能,塑料发动机支架可使发动机声音更加平稳。塑料的另外一个优点是其传热能力远低于铝合金。因此, Ultramid 发动机支架可在高温环境下为天然橡胶悬置提供更好的保护,延长其使用寿命。在二氧化碳排放方面,塑料支架的质量与铝合金相比减轻了 30% 以上,有助于降低排放。

支架主要用于与底座一起支撑发动机。发动机支架需要在承受永久荷载即发动机质量的同时,完全吸收发动机的扭矩。在此之前,发动机支架只能采用铝合金制造。(色母网)

欧文斯科宁与巴斯夫及昙卡结成战略联盟

玻璃纤维增强材料制造商欧文斯科宁日前宣布,其已加入巴斯夫与荷兰昙卡先进复合材料公司结成的战略联盟,三方将共同为用于汽车大规模量产的热塑性复合材料开发最佳的解决方案。

欧文斯科宁集团总裁 Arnaud Genis 表示:“汽车行业对更轻、更坚固且更加环保的产品需求正不断扩大,玻璃纤维材料仍未得到充分利用,通过将欧文斯科宁、巴斯夫及昙卡公司的人才与资源进行结合,我们将能够快速为客户找到最佳的解决方案。”

昙卡先进复合材料全球集团董事 Dave Clark 表示:“欧文斯科宁、巴斯夫与昙卡公司组建的战略联盟结合了全球领先的玻璃纤维、树脂及热塑性预浸料技术,这些技术对于提

高创新能力、构建汽车复合材料的可靠供应链是不可或缺的。”

在这一新组建的战略联盟中,巴斯夫将在热塑性树脂的生产及配方方面提供全面的知识,昙卡先进复合材料公司带来了在复合材料制造方面的专长,而欧文斯科宁集团则将提供面料及玻璃纤维增强材料的开发技术。(复材网)

聚碳酸酯仍将维持发展势头

2012 年全球聚碳酸酯总产能达 469.5 万 t。其中:美国萨比克公司 53 万 t/a,德国拜耳公司 33 万 t/a,泰国拜耳公司 27 万 t/a,美国拜耳公司 26 万 t/a,西班牙萨比克公司 26 万 t/a,沙特阿拉伯萨比克公司 26 万 t/a,比利时拜耳公司 24 万 t/a,荷兰萨比克公司 22 万 t/a,新加坡帝人化成公司 20 万 t/a,拜耳科技材料(中国)公司 20 万 t/a,台塑/出光公司 17.5 万 t/a,韩国 LG-陶氏化学公司 16 万 t/a,泰国 PC 公司 16 万 t/a,中国帝人化成公司 16 万 t/a,德国陶氏化学公司 15.5 万 t/a,台湾奇美/旭化成公司 14 万 t/a,日本帝人化成公司 12 万 t/a,韩国 SanYang 公司 11 万 t/a,美国陶氏化学公司 10.9 万 t/a,日本三菱瓦斯化学公司 9.5 万 t/a,中石化三菱化学 PC(北京)有限公司 6 万 t/a。位居前 4 位的厂商及其综合产能分别为:萨比克公司 131.5 万 t/a,拜耳公司 130 万 t/a,日本帝人公司 48 万 t/a,陶氏化学公司 47.9 万 t/a,产能分别占球 28.0%,27.7%,10.2% 和 10.2%。

预计今后几年,全球聚碳酸酯的产能依然处在增长进程上升通道。(慧聪网)

杜邦对尼龙 66 基体聚合物提价

自 3 月 18 日起或按合同允许,杜邦高性能聚合物部门将提价欧洲、中东以及非洲地区的杜邦 Zytel 尼龙 66 基体价格,涨幅为 150 欧元/t。杜邦高性能聚合物部门表示此次提价是为应对原材料上涨的压力。(工程塑料网)