

PBO-C/E 复合材料的界面及压力容器性能

张承双 崔霞 李翠云 王百亚 张阳

(西安航天复合材料研究所,西安 710025)

文 摘 研究了 PBO 纤维与 T700 碳纤维混杂复合材料的界面性能和压力容器性能。采用层间剪切强度测试和吸水率测试研究了不同混杂比对混杂复合材料界面粘接性能和吸水性能的影响。研制了 PBO 纤维与 T700 碳纤维混杂复合材料 $\Phi 150$ mm 压力容器,对容器的水压爆破性能和轴压承载性能进行了测试。结果表明:混杂复合材料的层间剪切强度随着混杂比增大逐渐升高,当 T700 碳纤维含量较低时,混杂复合材料界面粘接性能提高并不明显;混杂复合材料的吸水率介于 PBO 纤维和 T700 碳纤维复合材料之间,近似符合“混合定律”,界面数对混杂复合材料吸水性影响较大;混杂复合材料 $\Phi 150$ mm 容器的 PV/W 随着混杂比增大逐渐降低,混杂工艺能够使 PBO 纤维复合材料容器的轴压承载性能提高 31%。

关键词 PBO 纤维,碳纤维,混杂复合材料,界面性能,压力容器

中图分类号:TB33;TB4

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.02.007

Interfacial Properties and Pressure Vessel Performance of PBO Fiber and Carbon Fiber Hybrid Composites

ZHANG Chengshuang CUI Xia LI Cuiyun WANG Baiya ZHANG Yang

(Xi'an Aerospace Composite Research Institute, Xi'an 710025)

Abstract The interfacial properties and pressure vessel performance of PBO fiber and T700 carbon fiber hybrid composites were studied in this paper. The effects of hybrid ratio on interfacial adhesion properties and water absorption of hybrid composites were investigated by interlaminar shear strength (ILSS) and water absorption measurements. Standard $\Phi 150$ mm pressure vessels were prepared by PBO fiber and T700 carbon fiber hybrid composites. The water explosion and axial bearing tests of $\Phi 150$ mm pressure vessels were conducted. The results indicate that the ILSS of hybrid composites went up with hybrid ratio increasing, the interfacial adhesion properties of hybrid composites saw little improvement as T700 carbon fiber content was lower. The water absorption values of hybrid composites were between PBO and T700 fiber reinforced composites, which matches the mixture law nearly, and the number of interface had remarkable effect on water absorption of hybrid composites. The PV/W of $\Phi 150$ mm pressure vessels prepared by hybrid composites decreased as hybrid ratio increasing. The axial bearing property of PBO fiber reinforced composites was improved by 31% with hybrid technology.

Key words PBO fiber, Carbon fiber, Hybrid composites, Interfacial properties, Pressure vessel

0 引言

聚对苯撑苯并双噁唑(PBO)纤维最初是由美国空军材料实验室于 20 世纪 70 年代作为一种先进结构材料进行开发,其发展经历了由 20 世纪 80 年代初的发现、提出及探索,90 年代技术的逐步成熟和工业

化,以及世纪之交开始应用于特殊领域等阶段^[1-3]。PBO 纤维具有优异的力学性能、耐热性能和抗冲击性能,它在固体火箭发动机壳体、战车装甲防护、防护服、宇航探测以及通信光缆等高新技术领域具有广阔的应用前景^[4-5]。然而,已有的研究表明,PBO 纤维复

收稿日期:2014-07-11

作者简介:张承双,1983 年出生,博士,高级工程师,主要从事先进聚合物基复合材料制备与应用研究。E-mail:cszhang83@163.com

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015 年 第 2 期

— 29 —

合材料存在界面粘接性能较差、压缩性能偏低以及耐老化性能较差等问题,这在一定程度上限制了其应用^[6-8]。

混杂纤维复合材料技术是指采用两种或两种以上的纤维增强一种或多种树脂基体形成复合材料,它兼顾了强度、刚度、韧性等特性,克服了单一纤维复合材料的弱点,实现了综合性能的优化^[9-10]。为了解决 PBO 纤维复合材料界面粘接性能较差和压缩性能偏低等问题,本文基于碳纤维良好的界面粘接性能和优异的抗压缩性能,开展了 PBO 纤维与碳纤维混杂复合材料界面性能及压力容器性能研究。采用干法缠绕成型工艺制备了 PBO 纤维与 T700 碳纤维混杂复合材料,研究了不同混杂比对混杂复合材料界面粘接性能和吸水性能的影响。研制了 PBO 纤维与 T700 碳纤维混杂复合材料 $\Phi 150$ mm 容器,对容器的水压爆破性能和轴压承载性能进行了研究。

1 实验

1.1 原材料

增强纤维,PBO 纤维(Zylon-HM),日本东洋纺公司提供;T700 碳纤维,日本东丽公司提供。树脂基体,GF-2 环氧配方,本项目组自主开发,树脂基体由中国蓝星化工新材料有限公司无锡树脂厂提供。原材料性能如表 1 所示。

表 1 原材料性能

Tab.1 Properties of raw materials

材料	规格	拉伸强度 /MPa	拉伸模量 /GPa	断裂延伸 率/%	密度 /g·cm ⁻³
PBO 纤维	Zylon-HM	5800	280	2.5	1.56
碳纤维	T700-12K	4900	230	2.1	1.80
树脂基体	GF-2 环氧	101	3.7	4.1	1.25

1.2 试样制备

本文定义的混杂比为 PBO 纤维与 T700 碳纤维混杂复合材料中 T700 碳纤维的体积分数。采用干法缠绕成型工艺制备 PBO 纤维与 T700 碳纤维混杂复合材料单向板,复合材料具体铺层参数如表 2 所示,采用水切割设备将复合材料单向板加工成层间剪切试样和吸水性能测试试样,分别对复合材料的层间剪切强度和吸水性能进行测试。

对 PBO 纤维与 T700 碳纤维混杂复合材料 $\Phi 150$ mm 容器进行结构设计和工艺设计,分别制备 PBO 纤维和 T700 碳纤维预浸料,再利用四维缠绕机将两种预浸料缠绕到砂芯模表面,经固化、脱模后得到 PBO 纤维与 T700 碳纤维混杂复合材料 $\Phi 150$ mm 容器。将处理好的铝裙压至 $\Phi 150$ mm 容器筒身段,即得到 $\Phi 150$ mm 容器轴压承载性能测试试样件。

表 2 PBO 纤维与 T700 碳纤维混杂复合材料铺层参数¹⁾

Tab.2 Lamination parameters of PBO/T700 hybrid composites

编号	铺层参数	混杂比 $V_{CF}/\%$	界面数
1#	P ₁₃	0	-
2#	CP ₀ C	20	4
3#	CPCP ₃ CPC	36	12
4#	C ₃ P ₂ C ₃	54	4
5#	C ₀	100	-

注:1)P 代表 PBO 纤维,C 代表 T700 碳纤维,下脚标为铺层层数。

1.3 性能测试与表征

根据 JC/T 773—2010,利用 SANS 5105 型材料万能试验机对复合材料的层间剪切强度进行测试,加载速度为 2 mm/min。

根据 GB/T 1462—2005 对 PBO 纤维与 T700 碳纤维混杂复合材料的吸水性能进行测试。

根据 GB/T 6058—2005 对 PBO 纤维与 T700 碳纤维混杂复合材料 $\Phi 150$ mm 容器进行水压爆破性能试验。

根据 QJ 1412—1988 对 PBO 纤维与 T700 碳纤维混杂复合材料 $\Phi 150$ mm 轴压试验件进行轴压承载性能测试。

2 结果与讨论

2.1 界面粘接性能

采用层间剪切强度测试对 PBO 纤维与 T700 碳纤维混杂复合材料的界面粘接性能进行评价。混杂复合材料的层间剪切强度随混杂比的变化如图 1 所示。

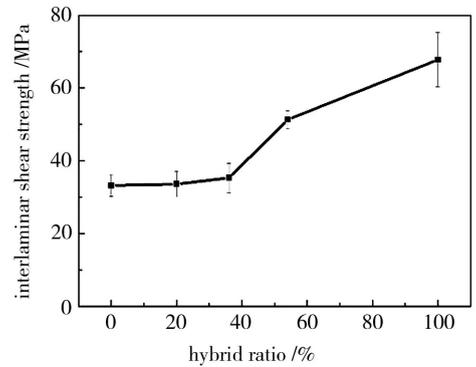


图 1 混杂比对混杂复合材料剪切性能的影响

Fig. 1 Influence of hybrid ratio on interlaminar shear strength of hybrid composites

从图 1 结果可以看出,PBO 纤维复合材料和 T700 碳纤维复合材料的层间剪切强度分别为 33.2 和 67.8 MPa,当混杂比 20%、36% 和 54% 时,混杂复合材料的层间剪切强度分别达到 33.6、35.3 和 51.3 MPa,这表明混杂工艺能够在一定程度上改善 PBO 纤维复合材料的界面粘接性能,但是当 T700 碳纤维

含量较低时,混杂复合材料的界面粘接性能提高并不明显。

2.2 吸水性能

混杂复合材料的吸水率随混杂比的变化如图2所示,可以看出,PBO纤维复合材料和T700碳纤维复合材料的饱和吸水率分别为1.06%和1.98%,当混杂比20%和54%时,混杂复合材料的饱和吸水率分别达到1.49%和1.59%,介于PBO纤维复合材料和T700碳纤维复合材料之间,近似符合“混合定律”。

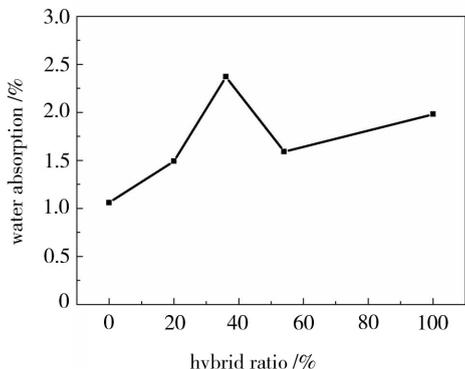


图2 混杂比对混杂复合材料吸水性能的影响

Fig. 2 Influence of hybrid ratio on water absorption of hybrid composites

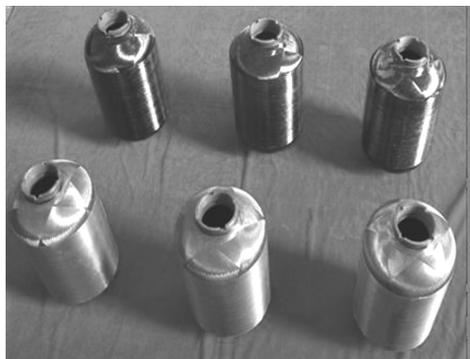


图3 PBO纤维与T700碳纤维混杂复合材料 $\Phi 150$ mm容器水压爆破试验前后的状态

Fig. 3 Images of $\Phi 150$ mm pressure vessels prepared by PBO/T700 hybrid composites before and after water explosion

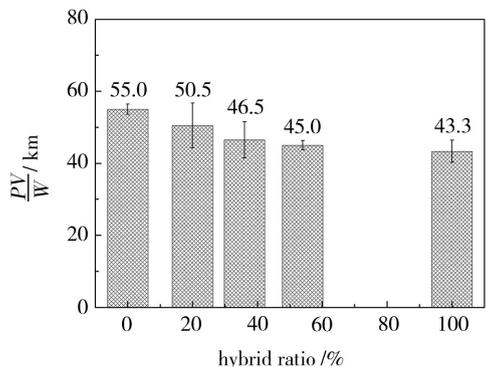


图4 混杂比对混杂复合材料 $\Phi 150$ mm容器性能的影响

Fig. 4 Influence of hybrid ratio on PV/W of $\Phi 150$ mm pressure vessel prepared by hybrid composites

当混杂比为36%时,混杂复合材料的饱和吸水率达到2.37%,远高于PBO纤维复合材料和T700碳纤维复合材料,这可能是由于混杂比为36%时,混杂复合材料的界面数为12,随着混杂复合材料内部界面数增加,纤维/树脂界面上的缺陷增多,导致水分子更容易渗透到复合材料内部。可见,混杂工艺能够使混杂复合材料的吸水性降低,但是界面数对混杂复合材料吸水性影响较大。

2.3 水压爆破性能

固体火箭发动机壳体特征系数(PV/W)是评估复合材料壳体设计水平、材料性能、成型工艺的综合指标,能够系统描述复合材料壳体研制水平。

当前主要通过 $\Phi 150$ mm和 $\Phi 480$ mm标准压力容器的研制及载荷试验,获得PV/W数值,用以表征复合材料壳体性能。本文研制了PBO纤维与T700碳纤维混杂复合材料 $\Phi 150$ mm容器,容器水压爆破试验前后的状态如图3所示。通过水压爆破性能试验对混杂复合材料容器的PV/W进行了研究,其结果如图4所示。从图中结果可以看出,PBO纤维复合材料和T700碳纤维复合材料 $\Phi 150$ mm容器的PV/W分别达到55和43.3 km,混杂复合材料容器的PV/W介于PBO纤维复合材料和T700碳纤维复合材料之间,并且随着混杂比增大,PV/W逐渐降低。

2.4 轴压承载性能

为了不过多降低混杂复合材料的PV/W,在容器内压性能试验的基础上,选择混杂比为20%研究混杂复合材料 $\Phi 150$ mm容器的轴压承载性能,结果见图5。

表3所示为混杂复合材料 $\Phi 150$ mm容器轴压承载性能测试结果,可以看出,PBO纤维复合材料和T700碳纤维复合材料 $\Phi 150$ mm容器的轴压承载分别为120和200 kN,当混杂比为20%时,混杂复合材料的轴压承载达到157.2 kN,比PBO纤维复合材料容器的轴压承载高31%。这表明,混杂工艺能够在不过多降低PBO纤维复合材料容器内压性能的前提下,使容器的轴压承载性能显著提高。

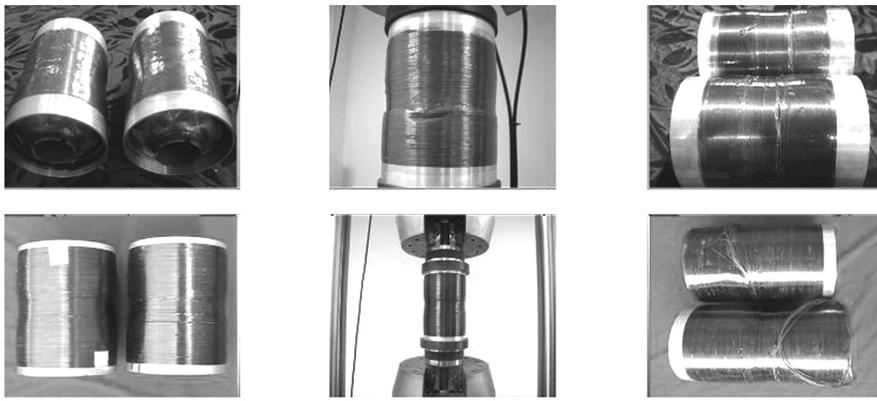


图5 PBO纤维与T700碳纤维混杂复合材料Φ150 mm容器轴压试验件及轴压测试情况

Fig. 5 Axial bearing test of Φ150 mm pressure vessels prepared by PBO/T700 hybrid composites

表3 PBO纤维与T700碳纤维混杂复合材料
Φ150 mm容器轴压承载性能

Tab. 3 Results of axial bearing test of Φ150 mm pressure vessels prepared by PBO/T700 hybrid composites

名称	混杂比 $V_{CF}/\%$	轴向载荷 /kN
PBO/GF-2 环氧	0	120
PBO/T700/GF-2 环氧	20	157.2
T700/GF-2 环氧	100	200

3 结论

(1) 混杂工艺能够在一定程度上改善 PBO 纤维复合材料的界面粘接性能, 但当 T700 碳纤维含量较低时, 混杂复合材料界面粘接性能提高并不明显;

(2) 混杂复合材料的吸水率介于 PBO 纤维复合材料和 T700 碳纤维复合材料之间, 近似符合“混合定律”, 界面数对混杂复合材料吸水性影响较大;

(3) 混杂复合材料 Φ150 mm 容器的 PV/W 随着混杂比增大逐渐降低, 混杂工艺能够使 PBO 纤维复合材料容器的轴压承载性能显著提高。

参考文献

- [1] So Y H. Rigid-rod polymers with enhanced lateral interactions[J]. Progress in Polymer Science, 2000, 25: 137-157
- [2] Hu X D, Jenkins S E, Min B G, et al. Rigid-rod polymers: synthesis, processing, simulation, structure, and properties[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2003, 288:

823-843

[3] Holmes G A, Rice K, Snyder C R. Review ballistic fibers: A review of the thermal, ultraviolet and hydrolytic stability of the benzoxazole ring structure[J]. Journal of Material Science, 2006, 41: 4105-4116

[4] 王晓蕾, 沈峰, 童喆益, 等. 空间推进系统用铝内衬 PBO 纤维缠绕高压气瓶的研制[J]. 宇航材料工艺, 2013, 43(4): 63-66

[5] 宫平, 段剑, 魏忠仁, 等. PBO 纤维复合材料抗弹性能研究[J]. 工程塑料应用, 2013, 41(4): 21-24

[6] Zhang C S, Li C Y, Wang B Y, et al. Effects of atmospheric air plasma treatment on interfacial properties of PBO fiber reinforced composites[J]. Applied Surface Science, 2013, 276: 190-197

[7] Zhang T, Jin J H, Yang S L, et al. A rigid-rod dihydroxy poly(p-phenylene benzobisoxazole) fiber with improved compressive strength[J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 78: 364-366

[8] 宋波, 傅倩, 刘小云, 等. 环境因素对 PBO 纤维老化的影响和储存寿命预测[J]. 材料研究学报, 2010, 24(5): 487-492

[9] 宋焕成, 张佐光. 混杂纤维复合材料[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1989

[10] 单建胜. 混杂复合材料的成型工艺及在固体发动机上的应用[J]. 固体火箭技术, 1996, 19(2): 61-71

(编辑 李洪泉)