

# 双马来酰亚胺树脂基二维编织复合材料结构件性能研究

Study on Performance of Structure Part of Bismaleimide  
Matrix Two-dimensional Braided Composites

李小刚, 李宏运, 胡宏军, 唐邦铭, 益小苏  
(北京航空材料研究院 先进复合材料国防科技重点实验室, 北京 100095)

LI Xiao-gang, LI Hong-yun,  
HU Hong-jun, TANG Bang-ming, YI Xiao-su  
(National Key Laboratory of Advanced Composites,  
Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**摘要:** 通过对 RTM 成型二维双马来酰亚胺 (BMI) 树脂基编织复合材料盒型试样件进行压缩性能测试, 分析发现其具有明显的各向异性, 而且结构件的性能不仅与材料本身性能有关, 而且与结构件的结构也有很大关系。

**关键词:** 编织复合材料; 压缩性能; 双马来酰亚胺树脂

**中图分类号:** TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2005) 08-0051-02

**Abstract:** Compression properties of rectangular specimen of two-dimensional bismaleimide (BMI) matrix braided composites prepared with resin transfer molding technology were studied. The specimen exhibited obvious anisotropic properties. In addition, its performance was affected by its intrinsic properties and structure as well.

**Key words:** braided composite; compression property; bismaleimide (BMI)

为追求先进复合材料的低成本、高性能制造技术, 扩展其应用范围, 无论是从原材料成本, 还是在其成型工艺方面研究人员均做出了大胆的探索与尝试<sup>[1]</sup>, 其中包括树脂传递模塑成型技术 (resin transfer molding technology) 与编织技术 (braiding technology) 二者的有机结合, 获得了一种材料——编织复合材料 (braided composites)<sup>[2,3]</sup>。

二维编织复合材料 (2D braided composites) 与传统的二维层合板复合材料 (2D lay-up composites) 相比, 避免了预浸料的制备与手工铺层的繁琐过程, 而是采用编织技术制造预成型体, 不仅增加了工艺的自动化程度, 提高了生产率, 同时也简化了铺层工艺, 降低了制造劳动强度和废品率<sup>[4]</sup>, 因此与低成本树脂传递模塑 (RTM, Resin Transfer Molding) 成型工艺相结合明显降低复合材料制造成本。此外, 由于编织增强体中纤维相互扭结与缠结, 其扭曲稳定性、抗冲击性能、剪切强度以及抗层分离性都优于其它形式的增强体。特别对于回转体而言, 可以结合单向带和长纱编织预制粗纱来进行自由设计, 并且是实现该形状结构件整体成型的理想工艺<sup>[5]</sup>。但由于国内在该领域研究起步较晚, 基础数据积累较少, 结构件设计依据缺少, 阻碍了编织复合材料的发展与应用。

因此, 本研究采用双马来酰亚胺树脂作为基体, 并采用 RTM 成型技术制备盒型结构件, 并对其力学性能进行研究, 以期对编织复合材料的结构设计提供依据。

## 1 实验部分

### 1.1 原材料

实验采用日本东丽公司生产的 12K, T700 的碳纤维, 所采用双马来酰亚胺树脂主要原材料及其生产厂家为 N,N'-4,4'-二苯甲烷双马来酰亚胺 (BMI), 洪湖市恒基化工有限公司; 烯丙基双酚 A, 上海树脂研究院; 稀释剂, 铁道科学研究院。

### 1.2 实验方法

利用德国 Steeger 公司制造的 HS140/144 二维水平编织机在盒型截面形状的芯模上编织预成型体, 利用 RTM 成型工艺, 将预成型体放入闭合模具中, 注入 BMI 树脂, 然后升温固化制备出盒型结构件。裁成一定尺寸 (如图 1 所示) 后, 通过 MTS-810 型力学试验测定仪进行 X, Y, Z 三方向的压缩性能测试, 完成盒型实验件的压缩性能测试, 并观察压缩过程中材料的破坏过程, 测出材料的载荷。

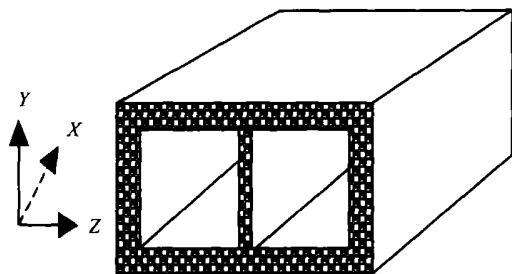


图1 盒型结构件压缩性能试样结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of compressed sample of structure part

## 2 结果与讨论

结构件的实际结构尺寸为  $88\text{mm} \times 76\text{mm}$ ，芯模上自行包覆编织碳纤维织物（编织角为  $30^\circ$ ），将两包覆芯模沿  $76\text{mm}$  边合并，再包覆一层编织角为  $30^\circ$  的编织布，形成含有两个  $88\text{mm} \times 76\text{mm}$  空截面积，中间有加强筋的长方形增强体，然后利用 RTM 成型工艺制备双马来酰亚胺树脂基编织复合材料盒型实验件，将其裁制成  $X$  方向长  $100\text{mm}$  的试样件。分别将试样件沿  $X, Y, Z$  三个方向进行压缩实验。

在盒型结构试样件受  $X$  方向压缩过程中，随着载荷的增加，盒型件首先在  $XZ$  平面局部分别出现内凹和外凸，随着载荷继续增加，进一步加大内凹与外凸的程度，直至试样破坏，结构件无法继续承载。

盒型试样件受  $Y$  方向压缩时，实验件的破坏过程与  $X$  方向压缩破坏过程相比，由于纤维的编织角度为  $30^\circ$ ，纤维在  $Y$  方向上的承载角度为  $60^\circ$ ，与垂直纤维方向偏差较大，所以该方向的承载能力较差，编织复合材料板的力学性能测试结果也证明了这一点。将  $30^\circ$  角的编织复合材料板在  $0, 15, 30, 45, 60, 75, 90^\circ$  的方向分别裁样并进行常规性能测试。图2为编织复合材料板不同方向的拉伸模量、弯曲模量以及压缩模量曲线。由图2可以看出，三种模量均在  $30 \sim 45$  之间出现一波峰，拉伸模量最大，达到  $50\text{GPa}$  以上，弯曲模量与压缩模量也在  $45 \sim 50\text{GPa}$  之间。该材料各模量的最低值均出现在  $90^\circ$  方向。 $0^\circ$  方向的模量均在  $30\text{GPa}$  以上，是  $90^\circ$  方向模量的三倍。盒型试样件在  $X$  方向受压时，相当于支撑壁受  $0^\circ$  压缩，而在  $Y$  方向受压时，相当于支撑壁受  $90^\circ$  压缩，因此可见盒型试样  $Y$  方向的最大载荷必然小于  $X$  方向的载荷。

图3为盒型件  $X$  方向压缩实验曲线图。从图3可以看出，盒型结构件在  $X$  方向的最大承受载荷为  $70\text{kN}$ ，形变达到  $1.5\%$ ，随后试样的承载能力迅速下降。图4是盒型结构件在  $Y$  方向的压缩性能，与图3相比，在该方向试样件最大载荷仍小于  $6\text{kN}$ ，形变也减小到  $1\%$ ，并且从实验结果看，该方向的承载性能分

散性大。

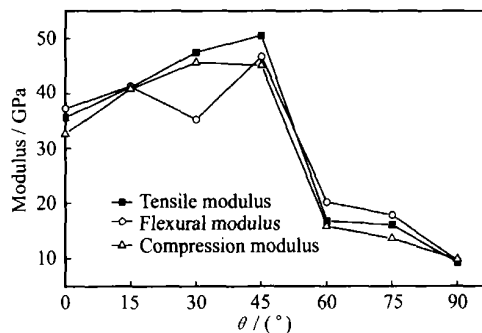
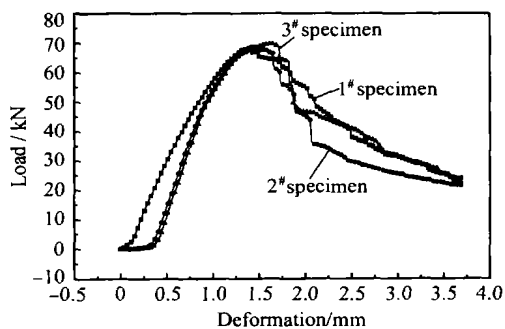
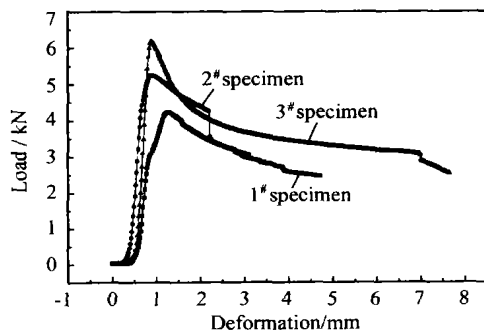


图2 编织复合材料板不同方向的强度性能

Fig.2 Mechanical properties of BMI resin matrix 2D composites in different direction

图3 盒型件  $X$  方向压缩实验曲线Fig.3 Curves of structure part in  $X$  direction图4 盒型件  $Y$  方向压缩实验曲线Fig.4 Curves of structure part in  $Y$  direction

当试样件沿  $Z$  方向压缩时，虽然也是支撑壁受  $90^\circ$  压缩，但由于结构设计问题，该方向载荷不仅垂直编织方向，支撑较弱，而且该方向的盒型件高度明显大于其他方向，因此极易失稳，所以载荷达到  $0.6\text{kN}$  就无法再进行增加，但承载能力相对于其他方向下降比较缓慢，图5为盒型件  $Z$  方向压缩实验曲线。

由以上性能测试可知，该盒型件的各向异性表现尤为明显，而且能够达到数量级的变化程度。其中  $X$  方向的承载能力最大，而另外两个方向的承载能力相

（下转第58页）

由于采用了较低的温度,不采用任何其他干扰技术,纤维间无搭桥、粘连现象。而且 CF 表面 C 元素的汽化较少, C 与沉积中的副产物 Si 基本无反应,没有对纤维表面造成损伤,涂覆涂层后纤维的拉伸性能基本没有下降。

(3) 由于涂层是由 SiC 相与无序 Si 相混合组成,导致了涂层的抗氧化性能效果不理想。需要继续探索工艺,得到拉伸性能和抗氧化性能俱佳的工艺参数。

(4) 涂覆后的热处理有促进涂层晶化的作用,可以用来改善涂层的致密性。

(5) 对涂层微观结构研究表明,射频直热法可以在 CF 表面涂覆一层均匀、牢固的涂层,此种方法作为一种涂覆涂层的新工艺有一定的研究和推广价值。

#### 参考文献

- [1] PETER S T. Handbook of composites [M]. London: Chapman & Hall, 1998. 169- 170.
- [2] 李贺军, 曾燮榕, 李克智, 等. 我国炭/炭复合材料研究进展 [J]. 炭素, 2001, (4): 8- 13.
- [3] TOSHIKI KINGETSU, MASA HARU TAKEHARA, TOSHIO YARII, et al. Correlation between the oxidation behavior and the microstructure of SiC coatings deposited on graphite substrates via chemical vapor deposition [J]. Thin Solid Films, 1998, 315: 139- 143.
- [4] CRSNMER D C. Fiber coating and characterization [J]. Amer Ceramic Soc Bull, 1989, 68 (2): 415- 419.
- [5] 王作明, 刘敏, 王玉庆. 碳纤维表面涂层方法及其性能 [J]. 新型碳材料, 1991, (3): 39- 44.
- [6] 焦 桓, 周万城, 李翔. CVD 法水蒸气条件下制备 SiC 块体 [J]. 材料工程, 2000, (12): 12- 15.
- [7] 赵稼祥. 制备石墨纤维的新技术- 射频直热法 [J]. 材料工程, 2001, (3): 37- 38.
- [8] 刘晓阳, 张长瑞, 周新贵. CVD SiC 涂层的致密化工艺研究 [J]. 新技术新工艺, 2002, (12): 38- 40.
- [9] 郑敏, 张蓬洲. 化学气相沉积法制备碳化硅纤维 [J]. 宇航材料工艺, 1996, (5): 27- 30.
- [10] KATSUKI KUSAKABE, BONG-KUK SEA, JUN-ICHIRO HAYASHI, et al. Coating of carbon fibers with amorphous SiC films as diffusion barriers by chemical vapor deposition with triisopropylsilane [J]. Carbon, 1996, 34 (2): 179- 185.
- [11] 陈新谋. 碳纤维表面涂覆碳化硅的工艺和装置 [P]. 中国专利: 02121071.3, 2003- 12- 17.
- [12] 薛增泉, 吴全德, 李浩. 薄膜物理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1991. 19- 27.
- [13] WANG Yu-qing, ZHOU Ben-lian, WANG Zuo-ming. Oxidation protection of carbon fibers by coatings [J]. Carbon, 1995, (33): 427- 433.
- [14] LIU X D, RULAND W. X-ray studies on the structure of polyacrylonitrile fibers [J]. Macromolecules, 1993, 26: 3030- 3036.

合材料表征及性能测试工作, 联系地址: 山东大学南校区材料学院碳纤维工程技术中心 (250061)。

\* \* \* \* \*

(上接第 52 页)

对较差。该材料结构件的结构设计对承载性能的影响程度也有待作更加深入的研究。

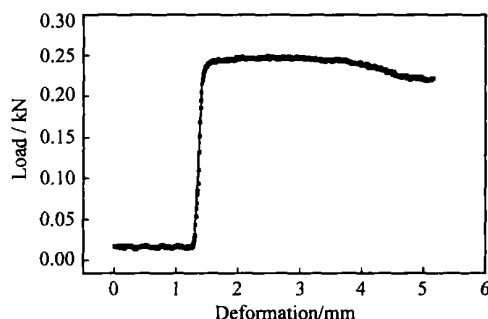


图5 盒形件 Z 方向压缩实验曲线

Fig. 5 Curves of structure part in Z direction

### 3 结论

(1) 编织角为 30 的复合材料结构件不同方向的承载能力存在数量级上的差别, 其中 X 方向的压缩性能最高。

(2) 编织复合材料结构件的承载能力不仅与编织角、承载方向有关, 而且与结构件的结构形式也存在一定关系。

(3) 如果将二维二轴编织复合材料改为二维三轴编织复合材料, 其在 X 方向的载荷将会得到进一步的提高。

#### 参考文献

- [1] 秦伟, 张志谦. 编织增强体液体成型复合材料及其界面的研究 [J]. 纤维复合材料, 2000, (3): 18- 20.
- [2] TAN P, TONG L & STEVEN G P. Modeling for predicting the mechanical properties of textile composites—a review [J]. Composites, 1997, 28 A: 903- 922.
- [3] KARLHEINZ HRSTING and BURKHARD WULHORST. New types of textile fabrics for fiber composites [J]. SAMPE Journal, 1993, 29 (1): 7- 12.
- [4] 李小刚, 李宏运, 胡宏军. BMI 树脂 RTM 成型工艺及其编织复合材料性能研究 [J]. 材料工程, 2004, (9): 52- 56.
- [5] MICHAEL BANNISTER. Challenges for composites into the next millennium—a reinforcement perspective [J]. Composites, 2001, 32: 901- 910.

收稿日期: 2004-05-20; 修订日期: 2005-05-26

作者简介: 李小刚 (1975-), 男, 博士研究生, 从事树脂基复合材料研究, 联系地址: 北京市 81 信箱 3 分箱 (100095)。

收稿日期: 2004-12-10; 修订日期: 2005-05-05

作者简介: 井敏 (1979-), 女, 硕士研究生, 主要从事碳纤维及其复