第 16 卷 第 3 期 复 合 材 料 学 报 Vol 16 No. 3
1999 年 8 月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA August 1999

编织复合材料拉伸力学性能的研究

卢子兴 冯志海* 寇长河 刘振国 陆 萌 麦汉超 唐国翌**
(北京航空航天大学固体力学所, 北京 100083)
(* 中国运载火箭技术研究院工艺材料研究所, 北京 100076) (** 清华大学材料系, 北京 100084)

摘 要 针对三维四向和五向编织复合材料进行了拉伸实验, 从宏观角度研究了它们的力学行为, 获得了这些材料的主要力学性能参数及变形、破坏规律。基于宏观实验, 本文还对拉伸试件断口进行了扫描电镜测试, 从细观角度对编织复合材料的破坏机制作了分析, 得到一些重要结论。这些结果为进一步研究编织复合材料的强度失效问题奠定了实验基础。

关键词 碳纤维, 编织结构, 复合材料, 拉伸, 力学性质
中图分类号 TB330.1

编织结构复合材料是一种新型的结构材料, 目前在结构设计中越来越受到人们的重视。众所周知, 传统的层合板复合材料具有难以克服的固有缺陷, 比如: 沿厚度方向的刚度和强度性能较差, 面内剪切和层间剪切强度较低, 易分层, 并且冲击韧性和损伤容限水平都较低。因此, 在很多情况下层合结构复合材料不能满足工程设计和使用的要求。为改进复合材料的力学性能, 需要在复合材料的刚度和强度较弱的方向加进增强纤维, 这种设想与纺织技术的结合就产生了编织结构复合材料。

伴随着新材料的产生, 三维编织复合材料力学性能的研究成为当今复合材料和力学界的研究热点。目前国际上 Yang 等[1]已提出了倾斜纤维模型, 他们用四个倾斜层板的集合来描述编织复合材料的特性。Frank[2]在实验观察的基础上, 建立了确定三维编织物几何尺寸的理论框架, 并用一个几何模型(FGM)预估织物和复合材料的强度和模量。国内吴德隆等从细观角度提出了由可重复的基元、面元和柱元构成的 3 cells 模型, 预测了编织结构复合材料的弹性模量和泊松比。李嘉禄[4]和孙慧玉等[5]也对三维编织复合材料进行了实验研究。

尽管国内外已发表了一些研究编织复合材料力学性能的文献, 但由于三维编织复合材料力学性能受多种因素的影响, 同时, 材料制作工艺复杂, 价格昂贵, 所以这方面的实验研究还很不充分, 仍需大量的实验来研究它们的变形和破坏规律, 从而为合理描述编织复合材料的力学行为奠定实验基础。本文针对三维四向和五向编织复合材料进行了拉伸实验, 从宏观角度研究了它们的力学行为, 获得了这些材料的主要力学性能参数。通过拉伸试件断口的扫描电镜分析, 从细观角度对这种材料的破坏机理作了研究, 得到一些重要结论。

收修改稿、初稿日期: 1998-09-17, 1998-07-24

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 实验描述

为研究编织几何参数和结构对材料力学性能的影响，本实验研究制备了六种材料，相关参数列于表 1 中。拉伸试件采用矩形板状试件，其尺寸见图 1。为保证试件拉伸时端部不首先破坏，在试件的两端用特殊的工艺分别粘贴 1 mm 厚的铝加强片。实验所用编织复合材料的增强纤维为碳纤维，基体为环氧树脂。拉伸实验在MTS 万能材料实验机上进行，加载速度为 1 mm/min，环境温度为 15℃，湿度为 18%。拉伸试件的变形用引伸计测量，标距为 25.5 mm。为了测量编织复合材料的弹性性质，除了用引伸计测量变形外，还采用电阻应变片(3 个应变片贴于试件中部，其尺寸分别为 10×5 mm 和 3×2 mm，较大的两个应变片贴在试件宽面上)测量了拉伸试件的轴向和横向变形，据此得到了编织复合材料的弹性模量和泊松比等力学性能。为研究编织复合材料拉伸破坏机制，对拉伸试件断口进行了扫描电镜分析，实验在 JSM-6301F 场发射电镜上进行。

表 1 六种材料的相关参数 Table 1 The parameters of materials

材料编号	体积密度/g·cm^{-3}	纤维体积分数/%	编织角/度	纤维束丝数	织物结构	轴向纤维数
1	1.58	54	42	12000	三维四向	0
2	1.52	45	21	9000	三维四向	0
3	1.57	58	42	9000	三维四向	0
4	1.56	45	48	9000	三维四向	0
5	1.54	54	41	6000	三维四向	0
6	1.48	44	40	9000	三维五向	1/3

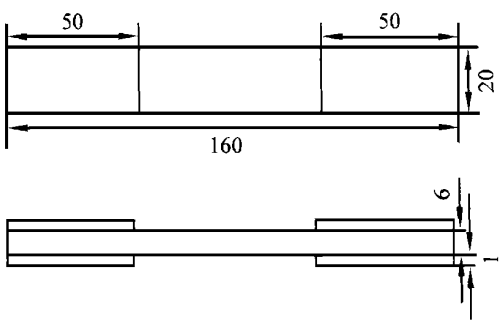

图 1 试件形状及尺寸

Fig. 1 The shape and size of specimen

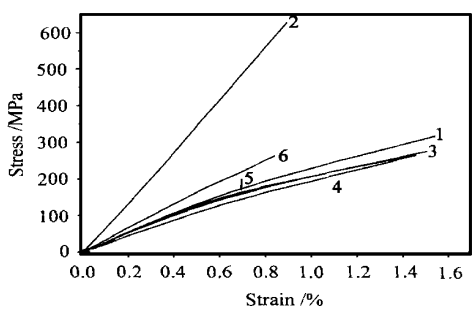

图 2 编织复合材料拉伸应力-应变曲线

Fig. 2 The tensile stress-strain curves of braided composite

2 实验结果和分析

图 2 给出了拉伸实验所得六种材料的拉伸应力-应变曲线，表 2 中列出了六种材料的主要力学性能参数。可见，四向编织复合材料中编织角最小(21°)的材料其强度和弹性模量最大，断裂应变最小。由图 2 还可看出编织角越小，其应力-应变曲线越接近于线性。根据表 1 提供的资料，第二种材料的纤维体积含量

表 2 六种材料的力学性能

Table 2 The mechanical properties of materials

材料编号	弹性模量/GPa	断裂强度/MPa	断裂应变/%
1	27.3	299	1.386
2	71.1	665	0.891
3	28.9	283	1.460
4	20.4	254	1.585
5	27.8	266	1.320
6	36.8	284	0.788

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图 3　拉伸断口的扫描电镜分析　　Fig. 3　SEM pictures of the broken surface

并不是最大的, 因此, 影响编织复合材料力学性能的最重要因素是它的编织角。在纤维体积含量一定的情况下, 编织角越小, 则编织复合材料的强度和模量越高。此外, 第二种材料的宏观断口观察表明: 纤维呈正应力拉断特征。并且, 在扫描电镜下可以看到纤维拉断的痕迹, 纤维束内无明显扭曲, 说明编织角小时, 纤维变形以拉伸为主(图 3a)。电镜分析结果还表明:

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

第二种材料的树脂与纤维的结合强度较高，受力过程中，树脂与纤维间界面无明显开裂，树脂基体中具有明显的塑性变形特征，在树脂与纤维界面处形成了十分清晰的剪切带(见图3b)。因此，在编织角较小的复合材料中纤维一直处于较均匀的受拉状态，故可以有效地发挥纤维的抗拉性能。同时，由于纤维和树脂基体的模量相差较大，故而受力时在纤维和基体的界面间存在较大的剪切应力。树脂受剪切作用而表现出较大的韧性，因而保持了材料的完整性，并且此时材料的变形和承载能力主要由纤维控制。当编织复合材料的编织角大于某个角度，材料的弹性模量和断裂强度会逐渐减小，而材料的表观延性将逐渐增强，断裂应变逐渐增大。究其原因，主要是基体材料的性能对编织复合材料整体力学性能的影响较大，纤维束处于复杂的受力状态，难以发挥它的抗拉性能。因此，对编织复合材料来说，确定上述编织角的临界值具有重要意义，因为它是表征编织复合材料破坏机制转变的一个重要参量。本文所用其他几种材料，其编织角都较大，但相互之间差异不大，故而它们的应力-应变曲线比较接近，都表现出明显的非线性性质(见图2)。参照表1和表2提供的数据可知：第一种和第三种材料的编织角相同(42°)，但纤维的体积含量不同。实验表明：纤维含量较高的材料具有较高的弹性模量，但具有较低的抗拉伸强度。导致上述结果的原因可以归结为材料孔隙度的影响。因为纤维含量较高的编织复合材料具有较低的体积密度，说明该材料中的确存在大量的孔隙。由此得到的结论是：适量的孔隙存在不会明显降低编织复合材料的弹性模量，但对材料的拉伸强度却有明显影响，孔隙的存在似乎也改善了复合材料的变形能力。第五种材料和上面两种材料的编织角相差不多(41°)，纤维体积含量略高于第一种材料，但比第三种材料低。观察其力学行为可见：除弹性模量外，其破坏强度和断裂应变比第一和第三种材料都低。其弹性模量比第一种材料高，但比第三种材料低。观察应力-应变曲线，不难看出上述三种材料的力学性能在变形初期差异不大，到了后期，第一种材料才显示了较高的强度。三种材料力学性能的差异以及同第二种材料力学性能之间的差别可从细观角度给予一些说明，图3c为第五种材料的断口形貌照片，它显示了纤维束弯曲断裂的痕迹，说明纤维束并非处于均匀的受拉状态。并且第五种材料中纤维与基体界面间存在不连续孔洞，拉伸过程中有纤维拔出，树脂基体呈明显塑性变形特征(图3d)，因而这种材料的结合强度较差，直接影响了它的最终强度。另外，纤维断裂时裂纹起源于表面，断面上既有脆性断裂特征，也有剪切韧断特征(图3e)，这是纤维束在复杂受力状态下破坏的结果。除了纤维束破坏与第五种材料相似外，第一种材料受力时纤维束沿界面开裂，基体树脂间无显著塑性变形痕迹，树脂断面平齐，呈脆性特征(图3f)，因而材料的强度较高，这与材料的宏观性能是一致的。而第三种材料在高倍放大下可看到纤维与基体间界面结合较好，界面处呈剪切的韧性特征，树脂基体中因塑性变形产生的剪切带也十分清晰(图3g)，所以这种材料的初始模量较高，但最终强度受树脂塑性变形的影响并不很高。由于编织角比较接近，所以对第四种材料未做断口分析。它的编织角最大(48°)，因此其弹性模量和拉伸断裂强度都较低，但它的变形能力却较好。根据前面的分析，编织角较大时，材料的失效模式与小编织角情况有所不同，此时，编织复合材料的非线性应力-应变行为主要由基体材料的破坏性质决定。编织角大时，纤维束会在拉伸过程中逐渐被拉直，并向拉伸方向转动，使基体材料除受到拉伸应力外，还受到较大的挤压应力，同时基体和纤维的界面上也存在较大的剪切力。在这些应力的共同作用下，基体材料的破坏不再是简单的脆性拉断，而是略呈塑性的压碎或剪切破坏。这样，基体及界面的破坏使基体材料暂时丧失了对纤维束网络的支撑和约束作用，从而使纤维束网络发生畸变(纤维束弯曲)，这样便降低了编织复合材料的承载能力，同时也产生较大的变形，由此便导致了应力-应变关系的非

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

线性。编织复合材料拉伸强度的大幅度降低, 同基体对纤维的作用密切相关, 相当多的纤维可能因剪切变形过大而破坏。

表 3　不同方法所得弹性性能的比较

Table 3　The comparison of elastic properties obtained by different methods

材料编号	(1) 弹性模量 /GPa	(2) 弹性模量 /GPa	(3) 弹性模量 /GPa	泊松比 ν_{12}	泊松比 ν_{13} *
1	27.3	28.0	28.1	0.517	0.617
2	71.0	67.2	70.4	0.596	0.617
3	28.9	28.7	29.4	0.513	0.640
4	20.4	22.4	25.0	0.603	0.748
5	27.8	27.3	27.9	0.463	0.700
6	36.8	36.8	36.0	0.513	0.576

注: (1) 为全程应力应变曲线测量结果; (2) 为小变形测量结果; (3) 为电测法测量结果; * 为厚度方向测量的泊松比

Note: (1) The results measured from stress-strain curves; (2) The results measured from small deformation; (3) The results measured from strain gage; * Poisson ratios measured in direction of thickness

第六种材料是五向编织复合材料, 它的纤维体积含量与第二种材料基本相同, 编织角为 40°。五向编织复合材料的弹性模量、拉伸断裂强度和断裂应变均小于第二种材料的相应值, 说明该材料中轴向纤维的分布不足以抵消编织角导致的模量和强度的降低。与其他材料相比较, 这种材料最脆、断裂应变最小。关于这一点从表 2 的实验结果也可明显地看出(比较三、四、五、六四种材料)。需要说明的是, 轴向纤维的加入会改变复合材料的变形和失效模式。它的加入会使基体材料更趋向于脆性破坏, 成为控制复合材料破坏的重要因素, 因而其应力-应变曲线更接近于线性关系。从五向编织复合材料的低倍断口照片上也可看到非轴向纤维束的弯曲情况(这里略去照片), 并且纤维单丝与基体界面呈明显分离状, 虽然纤维间树脂基体呈塑性变形特征(图 3h), 但基体破坏以脆性破坏为主。此外, 纤维单丝断口平齐, 裂纹起源于表面, 也呈现明显的脆性变形特征(图 3i)。

需要指出的是, 表 2 中材料的弹性模量是由拉伸应力-应变曲线得到的。采用小变形测量, 也可得到材料的弹性模量(见表 3)。另外, 用电测法得到的各种材料的弹性模量和泊松比也列在表 3 中。通过实验结果的对比可见, 用引伸计在小变形下测得的弹性模量与用全程应力-应变曲线得到的结果一致; 而用电测法得到的弹性模量略大于引伸计测量的结果, 说明电阻应变片测量的变形偏小。因拉伸试件较薄, 所以在厚度方向只能采用较小的电阻应变片测量, 故而厚度方向的泊松比仅供参考。由表 3 提供的泊松比, 似乎有下面的结论: 即, 在相同的纤维体积含量下, 编织角大的材料泊松比较大; 而五向编织复合材料的泊松比则较小。

3　结　　论

(1) 在相同纤维体积含量下, 编织角的大小直接影响着编织复合材料的应力-应变行为。编织角较小时, 材料的性质主要由纤维控制, 多数纤维的破坏是拉伸破坏, 材料的应力-应变关系接近线性。而在编织角较大的情况下, 材料的性质主要由基体控制, 纤维的破坏形式较为复杂, 材料的应力-应变关系趋于非线性。

(2) 纤维体积含量、材料制作过程中引入的孔隙和界面缺陷也明显影响着材料的力学性能。

(3) 小编织角的复合材料, 其强度和刚度较好, 但材料的变形能力较差。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(4) 沿编织方向, 五向编织材料一般比相同纤维体积含量的四向编织复合材料的强度和模量要高, 但脆性也明显增加。在编织角和体积含量相同的情况下, 五向编织复合材料一般也具有不同的破坏机制, 轴向纤维的加入使材料的应力-应变关系更趋于线性化。

(5) 在相同的纤维体积含量下, 编织角大的复合材料泊松比一般较大; 另外, 在相同的纤维体积含量下, 五向编织复合材料的泊松比相对较小。

参 考 文 献

1 Yang J M, Ma C L, Chou T W. Fiber inclination model of three-dimensional textile structural composites. J Comp Mater, 1986, 20: 472～484

2 Frank K Ko, Chritipher M P. Structure and properties of an integrated 3-D fabric for structural composite. Recent Advances in Composites in the United States and Japan, ASTM STP 864, 1985, 428～439

3 吴德隆, 郝兆平. 五向编织结构复合材料的分析模型. 宇航学报, 1993, 14(3): 40～51

4 李嘉禄, 肖丽华, 董孚允. 立体多向编织结构对复合材料性能的影响. 复合材料学报, 1996, 13(3): 71～75

5 孙慧玉, 吴长春. 纺织结构复合材料力学性能的实验研究. 实验力学, 1997, 12(3): 335～341

STUDIES ON TENSILE PROPERTIES OF BRAIDED STRUCTURAL COMPOSITE MATERIALS

Lu Zixing Feng Zhihai* Kou Changhe Liu Zhenguo
Lu Meng Mai Hanchao Tang Guoyi**

(Research Center of Solid Mechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

(* Beijing Institute of Technology and Materials, Beijing 100076)

(** Dept. of Material Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract The tensile experiments have been done for the 4D (four-direction) and 5D (five-direction) braided composites. Their mechanical properties are investigated from the macroscopic view and some principal mechanical properties as well as thier deformational characteristics are obtained at the same time. On the basis of tensile experiments, the SEM analyses of tensile broken specimens have been conducted. The failure mechanism of braided composites is discussed from the microscopic view, by which some important conclusions are drawn. These results can provide an experimental basis for further studies on failure problems of braided composites.

Key words carbon fiber, braided structures, composite materials, tension, mechanical properties

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net