第 16 卷 第 4 期 复 合 材 料 学 报 Vol 16 No. 4
1999 年 10 月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA October 1999

三维四向编织碳/环氧复合材料实验研究

庞宝君 杜善义 韩杰才 赫晓东 严 勇
(哈尔滨工业大学 复合材料研究所, 哈尔滨 150001)

摘 要 讨论了三维四向编织碳/环氧复合材料力学性能研究的实验方法。通过实验得到了弹性常数及反映材料非线性行为的力学性能指标随编织角的变化规律, 并分析讨论了编织参数对该类材料破坏模式的影响作用。

关键词 编织复合材料, 力学性能, 实验研究
中图分类号 TB332

复合材料力学性能的实验研究在复合材料的开发与应用中发挥着重要作用。尤其是在材料设计研究中, 实验研究对于评价加工工艺及原材料性能对复合材料性能的影响具有十分重要的意义。迄今已有许多种实验方法, 其中有些方法比较简单, 已经制定了标准; 然而, 有些实验方法涉及复合材料固有的复杂性, 尚不够成熟, 有待进一步进行研究。三维编织复合材料是近几年开发研制的新型复合材料, 在航空航天等高科技领域具有广阔的应用前景。其性能表征及测试方法都未形成成熟的标准, 需要进一步进行研究探讨。

A. B. Macander 等人[1]于 1986 进行了一组实验, 结果表明, 三维编织物能大幅度地提高复合材料强度和刚度。Fukuta[2]对 Carbon/epoxy 三维三向、三维四向及层合板材料冲击后的压缩强度进行了比较研究。比较发现, 三维编织复合材料的冲击压缩强度较层合材料高, 说明其具有优秀的强度保持性。L. W. Gause 等[3]通过实验证实良好的抗损坏性是复合材料三维编织结构所具有的突出特点。F. K. Ko[4~5]用玻纤/环氧和碳纤/PEEK 完成了类似实验。佐藤等[6]对火箭喷管用石墨材料、二维 C/C 复合材料、三维 C/C 复合材料的热冲击强度及其断裂韧性进行了实验研究。实验结果发现, 二维 C/C 复合材料由于纤维强化面内和层合方向存在各向异性, 导致层间剥离破坏。而三维 C/C 复合材料的热冲击破坏韧性是 ATJ 石墨的 19 倍以上, 显示出其具有非常卓越的抗热冲击性能。孙慧玉等[7]对编织复合材料的力学性能也进行了实验研究。

为了探讨三维四向编织复合材料力学性能与编织参数间的关系及编织复合材料力学性能的实验研究方法, 以碳/环氧三维四向编织复合材料为对象进行了拉伸及压缩实验, 得到了有关实验数据, 并对实验结果进行了分析讨论。

1 实验原理及方法

利用岛津 DSS-10T 材料试验机对试件进行加载, 采用汉中中原电测仪器厂 BA 120-5AA-C15% 应变计, 通过 KYOWA-DPM 613A 型动态应变仪测量其变形。

收修改稿、初稿日期: 1998-09-25, 1998-08-25

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

试件材料为三维四向碳/环氧编织复合材料, 由天津纺织工学院复合材料研究所研制。基体材料为 TDE-85# 环氧树脂, 增强纤维为 T300 碳纤维, 纤维束规格为 12 K, 采用树脂传递模塑(RTM)工艺制成。

拉伸试件采用板状形式, 其尺寸如图 1 所示。用铝片对板状试件的两端进行加强, 为消除偏心拉伸给实验结果带来的影响, 在试件的正反面分别粘贴纵向工作应变片 R_1、R_2 及横向工作应变片 R_1'、R_2', 在补偿块上粘贴纵向补偿片 R_3、R_4 及横向补偿片 R_3'、R_4'。纵向应变利用由纵向工作应变片 R_1、R_2 及纵向补偿片 R_3、R_4 所组成的全桥线路进行测量; 类似地, 横向应变利用横向工作应变片及横向补偿片进行测量。

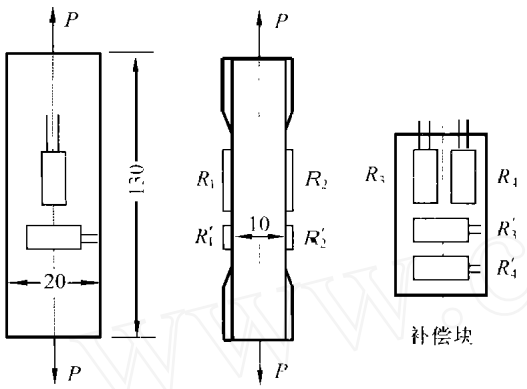

图 1　拉伸试件

Fig. 1　Tensile specimen

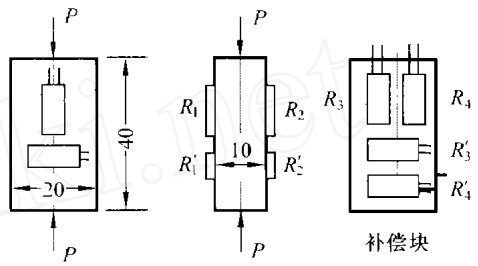

图 2　压缩试件

Fig. 2　Compression specimen

压缩试件尺寸如图 2 所示。为消除偏心拉伸给实验结果带来的影响, 在试件的正反面分别粘贴纵向工作应变片 R_1、R_2 及横向工作应变片 R_1'、R_2'。在补偿片上, 粘贴纵向补偿片 R_3、R_4 及横向补偿片 R_3'、R_4', 测量方法与拉伸实验相同。

图 3 为编织复合材料试件在纵向压缩时其侧表面的云纹干涉图。由图可见, 在压缩试件与试验机横梁相接触的局部区域存在不均匀应变区, 除此以外从整体上看, 试件的宏观变形是均匀的。

图 3　压缩试件表面云纹干涉图

Fig. 3　The interface diagram of compressive specimen

2　实验结果的分析与讨论

2.1　材料弹性常数

杨氏弹性模量随编织角变化的实验结果如图 4 所示。图中 E_L 为纵向杨氏弹性模量, 即沿编织方向的杨氏弹性模量。E_T 为横向杨氏弹性模量, 即垂直于编织方向的杨氏弹性模量。其中"▲"为通过拉伸实验测得的纵向杨氏弹性模量的实验点,"●"为通过压缩实验所测得的纵向杨氏弹性模量实验点。从实验结果可见, 由拉伸实验与压缩实验所测杨氏弹性模量均分布在一个带型区域内, 随编织角(编织纤维束与编织方向的夹角)的增加纵向杨氏弹性模量递减。尽管实验点分散较大, 但本文的实验结果与庞宝君[8]采用有限元法和等效夹杂法所进行的理论预报曲线具有相同的变化趋势。实验点的分散可能

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

与编织复合材料试样材质本身的分散、试件的装卡对中、测量的误差等因素有关。横向杨氏弹性模量是通过压缩实验得到的,实验点与两种理论预报结果吻合均较好。

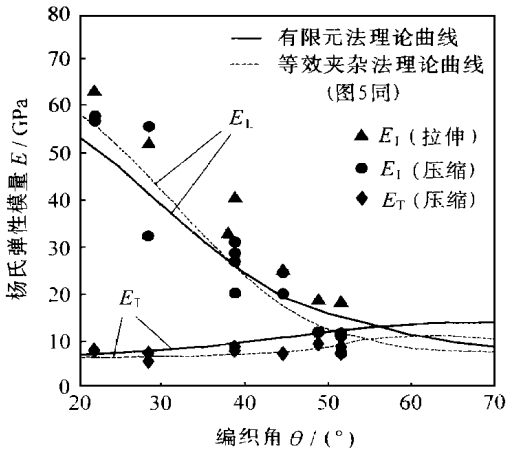

图 4 杨氏弹性模量

Fig. 4 Young's modulus

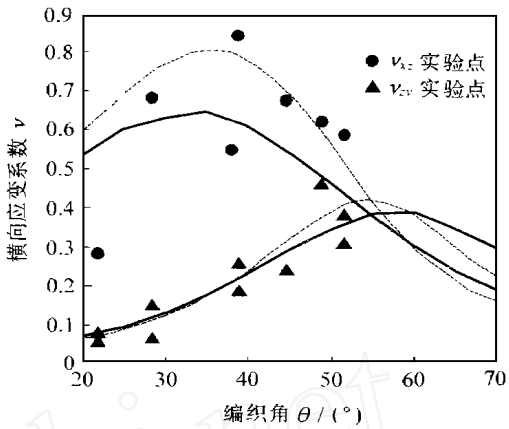

图 5 横向应变系数随编织角的变化

Fig. 5 Transverse strain ratio

图 5 为不同编织角的横向应变系数实验结果。图中 ν_{xz} 实验点较为分散,但采用有限元法与等效夹杂法预报的理论曲线[8]也有显著的差异,从实验点的分布趋势来看,实验点介于两种理论预报曲线中间。相对地说,ν_{zy} 实验点分散度较小,且两种理论对 ν_{zy} 的预报结果也比较一致,ν_{zy} 实验点与两种理论预报曲线均比较吻合。

2.2 应力-应变曲线

图 6 为编织角 θ= 48.84 的三维四向碳/环氧编织复合材料拉伸卸载循环应力-应变曲线,即应力-应变全曲线。应力-应变全曲线的包络线,可以作为拉伸应力-应变曲线。曲线近乎双线性,而且,非弹性范围比弹性范围宽,呈现出较好的延性。由应力-应变全曲线可见,随变形量的增加,卸载后再加载的模量逐渐减小。其卸载后再加载的等效弹性模量随拉伸应变的变化如图

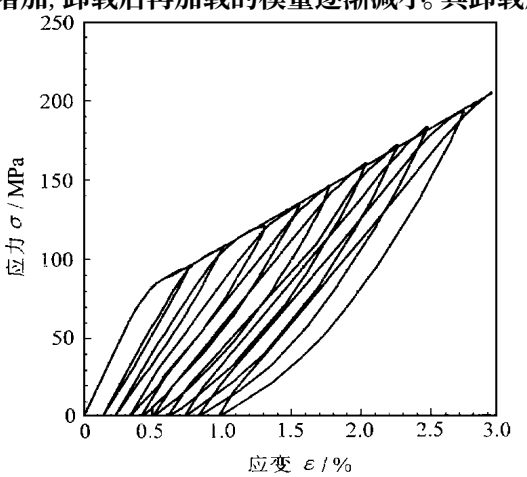

图 6 单轴拉伸应力-应变全曲线

Fig. 6 The uniaxial stress-strain curve

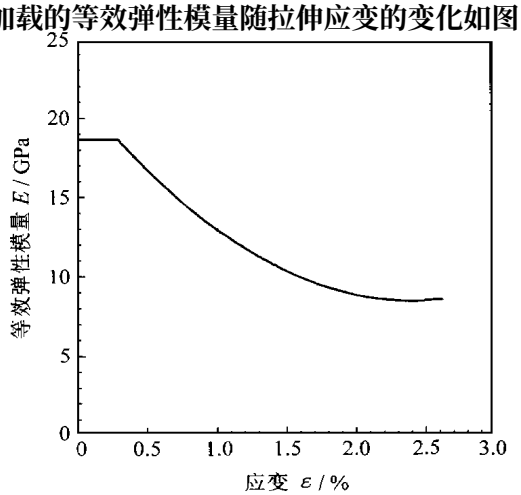

图 7 等效弹性模量随应变的变化

Fig. 7 Variation of effective elastic modulus vs strain

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

7 所示。最初, 其等效弹性模量为常数, 当达到初始破坏应变时开始减小, 然后随变形量的增加而递减, 当变形达到极限应变时试件断裂。图 7 表明了复合材料内部损伤从发生、发展直至损伤积累到一定程度试件破坏的损伤演化过程。

四向编织复合材料轴向拉伸极限断裂应变是其应力应变关系的重要参数, 其数值应与编织角、基体及增强纤维的极限断裂应变有关。拉伸极限断裂应变随编织角变化的实验结果如图 8 所示。由图可见, 在限于所进行实验的编织角范围($\theta = 20° \sim 50°$)内, 拉伸极限应变随编织角的增加而递增。图中曲线为对实验点进行拟合而得到的, 其表达式为:

$$\epsilon_u = (1 - \mathrm{tg}^2\theta)\epsilon_f + \mathrm{tg}^2\theta\epsilon_m$$

其中, ϵ_u 及 ϵ_f 分别为三维四向编织复合材料及增强纤维沿轴向方向的拉伸极限断裂应变。ϵ_m 为基体材料的拉伸极限断裂应变。

图 9 为初始破坏应力及极限断裂应力随编织角的变化规律实验结果。图中虚线为对初始破坏应力实验点进行拟合得到的曲线, 实线为对极限断裂应力实验点进行拟合而得到的, 近乎于直线。类似地, 在限于所进行实验的编织角范围内极限断裂应力随编织角的增加而线性递减。极限断裂应力与初始破坏应力的差值与极限断裂应力的比值反映了材料非线性范围的大小。由图 9 可见, 在编织角 $\theta = 20° \sim 50°$ 范围内, 随编织角的减小其非线性范围逐渐减小, 其编织复合材料的破坏由延性破坏趋向于脆性破坏。

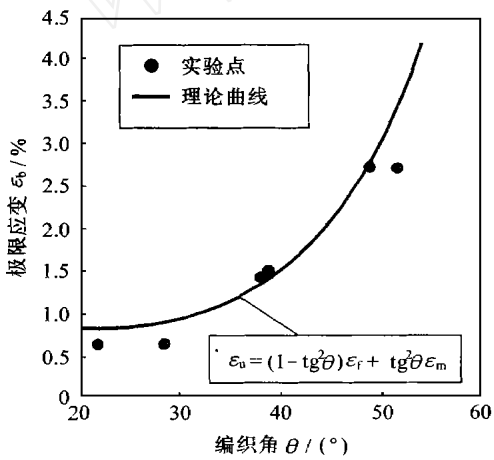

图 8　拉伸极限应变随编织角的变化

Fig. 8　The ultimate tensile strain

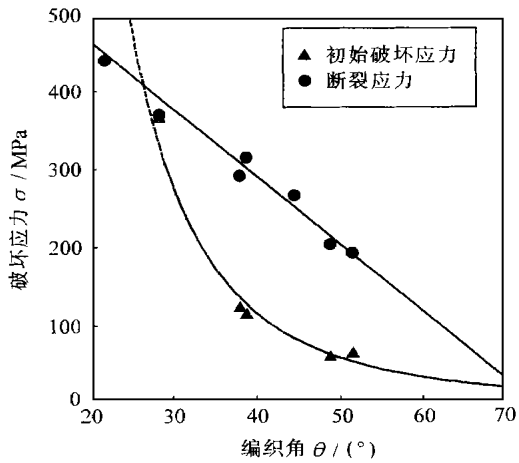

图 9　初始破坏应力及断裂应力

Fig. 9　Stress of impending failure and stress of fracture

2.3　材料破坏模式分析

图 10 为拉伸破坏及断口照片。由断口照片可见, 从基体中拔出的纤维束保持圆柱状。图 11 为拉伸实验过程中试件表面云纹干涉图照片。从宏观上来看, 试件表面云纹基本上与试件轴线垂直, 并比较均匀。因此, 试件表面可以看作是一个宏观均匀的应变场。然而, 沿轴线方向明亮条纹的分界线都在表面编织花节的分界线上, 而编织花节分界线处是基体材料, 可见在纤维束之间的基体存在较大的变形。由此可见, 在细观上编织复合材料内部的变形场是非均匀的。

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

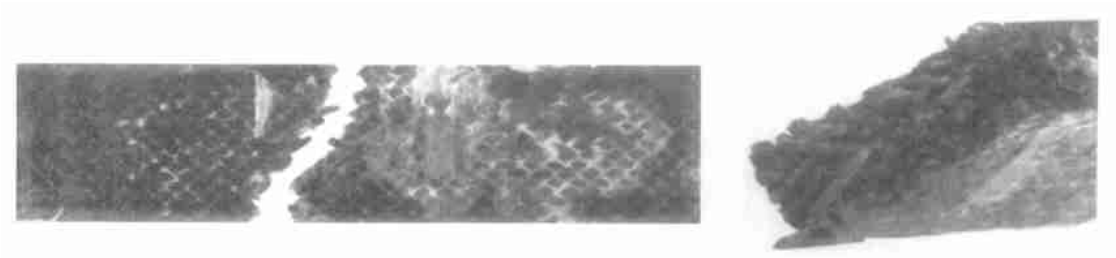

图 10 拉伸破坏及断口

Fig. 10 Failure and fractography of the tensile oblique intersection

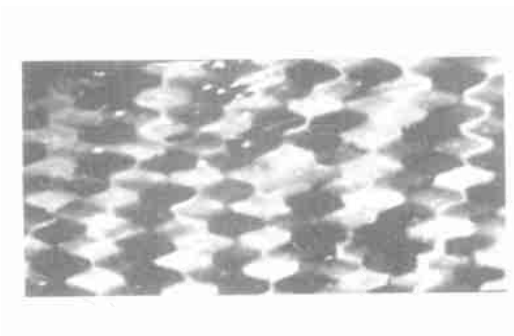

图 11 拉伸试件表面云纹干涉图

Fig. 11 The interfere diagram of tensile specimen

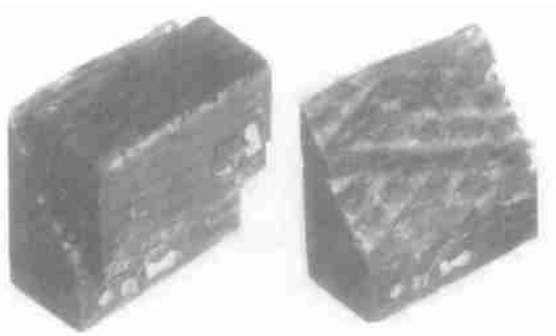

图 12 横向压缩剪切型破坏

Fig. 12 Shear-failure under lateral compression

图 12 为横向压缩剪切型破坏的照片(编织角 θ= 21. 98°)。由照片可见, 破坏后的断口与压缩方向大约成 45°方向, 类似于铸铁压缩的破坏断口。图 13 为横向压缩塑性型破坏的照片(编织角 θ= 48. 84°)。压缩后的试件呈腰鼓状, 类似于低碳钢压缩屈服破坏。从以上两照片的对比中可以发现, 不同编织角的四向编织复合材料在横向压缩作用下, 具有不同的破坏型式。随编织角的增大其破坏形式将由编织角 θ= 21. 98 的"脆性"破坏过渡到编织角 θ= 48. 84 的"塑性"破坏。

图 13 横向压缩塑性破坏

Fig. 13 Yield-failure under lateral compression

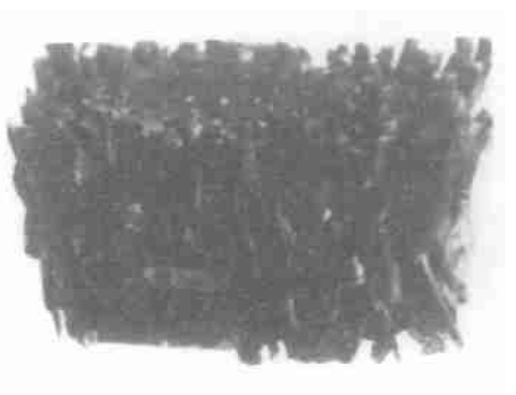

图 14 纵向压缩松散破坏

Fig. 14 Relaxing-failure under axial compression

图 14 为编织角 θ= 21. 98 的纵向压缩松散型破坏照片。当纵向压力达到一定数值时, 基体材料丧失约束纤维束的能力, 试件突然发生松散型破坏。

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

3 结论与讨论

本文中探讨了编织复合材料力学性能研究的实验方法, 通过实验得到了关于三维四向碳/环氧编织复合材料力学性能的有关实验结果:

(1) 得到了三维四向碳/环氧编织复合材料的纵向弹性模量、横向弹性模量、横向应变系数随编织角的变化规律;

(2) 得到并分析了循环加载卸载的应力应变曲线的变化规律;

(3) 得到了一些反映材料强度及非线性行为的材料力学性能指标随编织角的变化规律;

(4) 分析讨论了编织角对材料破坏模式的影响作用。

参 考 文 献

1 Macander A B, Crane R M, *et al*. Fabrication and mechanical properties of multi-dimensionally (X-D) braided composite materials. In: Whitney J M, ed. Composite Materials: Testing and Design (7th Conf.). STP893, *ASTM*, 1986. 422～443

2 Fukuta K. Three-dimensional braided composite material. *J of the Japan Society for Composites Materials*, 1995, 21 (2): 51～60

3 Gause L W, Alper J. Mechanical characterization of magnaweave braided composites. Paper Presented at the Mechanics of Composites, Review. Air Force Materials Laboratory, 1983

4 Frank Ko, Hartman D. Impact behavior of 2D and 3D glass/epoxy composites. *SAMPE*, 1986 (July/August): 26～29

5 Frank Ko, Chou H, Ying E. Damage tolerance of 3D braided commingled carbon/peek composites. In: Proceedings of the Advanced Composites Conference, 1986

6 Sato S, Kurumada A, *et al*. Evaluations of thermal shock resistance and the fracture toughness of graphite for rocket nozzle throat. *Journal of the Japan Society for Aerospace*. 1984, 32(11): 49～58

7 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

8 庞宝君. 三维多向编织复合材料性能预报与优化设计研究: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1997

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THREE-DIMENSIONAL FOUR-DIRECTIONAL BRAIDED CARBON/EPOXY COMPOSITES

Pang Baojun　Du Shanyi　Han Jiecai　He Xiaodong　Yan Yong

(Institute of Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001)

Abstract　The experimental method on the mechanical properties of four-directional braided carbon/epoxy composites is discussed. The corresponding elastic constants and parameters depend on braided angles and nonlinear behavior of materials. Finally, the effect of braided parameters on the failure mode of materials is analyzed and discussed.

Key words　braided composites, mechanical properties, experimental investigation

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