

文章编号: 1001-4888(2008)03-0206-07

三维正交机织复合材料的力学性能研究^{*}

余育苗, 王肖钧, 王志海, 李永池

(中国科学技术大学 近代力学系, 合肥 230027)

摘要: 利用材料试验机装置开展了三维正交机织 Kevlar/乙烯基树脂复合材料力学实验, 实验表明面内经向拉伸和厚度 z 方向压缩时, 材料具有一定的应变率效应, 厚度 z 方向压缩强度远大于面内压缩强度, 而面内经向和纬向的拉伸强度则相当。结合纤维的编织方式, 对这些现象做了必要的定性分析。最后, 本文基于三维正交机织复合材料的结构特点, 推导了一组可用于估算三维正交机织复合材料弹性模量的公式, 估算结果和实验值接近。

关键词: 三维正交机织; Kevlar; 复合材料; 弹性模量

中图分类号: V258; O346.4

文献标识码: A

0 引言

传统的纤维增强层合材料具有易分层、抗冲击性能差、损伤容限低等缺点^[1]。三维结构复合材料由于在厚度方向上引入增强纤维, 可以有效的改善材料力学性能。三维正交机织技术操作简单而且费用低, 是最有前景的三维纺织技术之一^[2], 其生产的三维正交机织复合材料(three dimension orthogonal woven composite, 简称 3D-OWC)在空间上有三组相互正交的纤维束, 分别称为经纱(warp yarn), 纬纱(weft yarn)和 Z 纱(Z yarn), 每束纱均包含了成千上万根取向一致的纤维, 其中 Z 纱将经纱和纬纱所形成的叠层在 z 方向上贯穿起来形成一个三维的整体, 从而提高了层间抗冲击损伤的能力。

国内外学者对 3D-OWC 进行了许多研究, 这些工作主要包括动静态材料力学性能的实验与理论研究、细观结构模型的建立以及细观几何参数与宏观力学性能间的关系研究等。如 Cox 研究了石墨/环氧树脂 3D-OWC 在拉伸、压缩、弯曲作用下的破坏机理^[3], Tan 对碳纤维/环氧树脂 3D-OWC 进行了大量实验研究, 并提出有限元分析模型^[4-5], Kuo 研究了机织过程对 3D-OWC 力学性能的影响^[6], 顾伯洪进行混杂纤维 3D-OWC 的面内冲击压缩实验和吸能性能研究^[7], 王均对玻璃纤维/乙烯基树脂 3D-OWC 进行的拉伸与弯曲实验研究^[8], 蔡敢为以三向纤维体积分数为参数所建立材料性能的细观模型^[9]等等。由于 3D-OWC 的力学性能受许多因素影响, 如纤维类型、基体类型、织物结构、成型方法、测试技术等, 使得目前关于 3D-OWC 的研究结果差异较大, 因此还有许多工作需要继续。本文主要针对 Kevlar 纤维/乙烯基树脂 3D-OWC 展开一系列的实验研究, 对不同方向上材料的应变率效应和强度效应进行了分析, 在此基础上, 根据 3D-OWC 纤维的铺设方式, 讨论了一种可以计算 3D-OWC 材料弹性模量的方法。

1 实验概述

实验材料为 Kevlar/乙烯基树脂 3D-OWC, 见图 1, (a) 为试件的表面结构, (b) 为 z 向结构。其中

^{*} 收稿日期: 2008-03-13; 修订日期: 2008-05-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10572134)和国防科技重点实验室基金项目(51453030205ZK0101)

通讯作者: 王肖钧(1941—), 男, 博导, 教授, 从事冲击动力学实验与数值计算研究工作。E-mail: xjwang@ustc.edu.cn

Kevlar29 纤维的密度为 $1.44\text{g}/\text{cm}^3$ ，经向、纬向、 z 向上的纤维纱线粗细分别为 628tex ， 628tex ， 314tex ，而三个方向的纤维含量分别约为 25% ， 25% ， 10% 。基体为 854 乙烯基树脂。生产厂家提供的纤维和基体性能参数见表 1。

3D-OWC 的整体结构如图 2 所示。图中 x 、 y 、 z 分别表示面内经向、纬向和厚度 z 方向。经纱和纬纱均为平直铺设，经纱层和纬纱层按照 $0^\circ/90^\circ$ 互相叠层， Z 纱将叠层贯穿起来形成 3D-OWC 结构，然后再灌注树脂成型。

表 1 纤维和基体性能参数
Tab. 1 Property parameters of fiber and resin

性能	方向	Kevlar29	854 乙烯基树脂
拉伸强度	纵向	2.8GPa	82MPa
拉伸弹性模量	纵向	70GPa	3.28GPa
	横向	6.2GPa	3.28GPa
压缩强度	纵向/横向	—	115MPa
压缩弹性模量	纵向/横向	—	3.7GPa

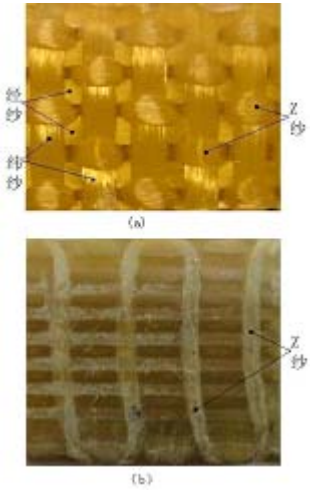


图 1 Kevlar/乙烯基树脂 3D-OWC
Fig. 1 Kevlar/Vinyl 3D-OWC

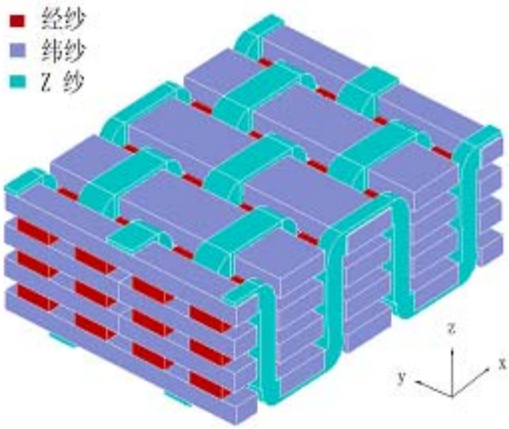


图 2 3D-OWC 结构示意图
Fig. 2 Sketch of 3D-OWC

实验在中国科学技术大学材料重点实验室 MTS810 材料试验机上进行，包括面内经向、纬向的拉伸实验； z 向及面内的压缩实验。拉伸试件采用 GB/T1040.4—2006 标准^[10]，压缩试件为立方柱试件。

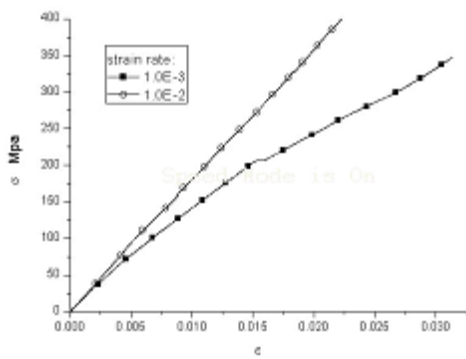
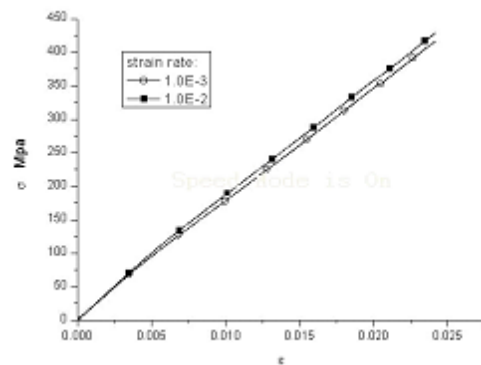
2 实验结果和讨论

2.1 拉伸实验

图 3，图 4 分别为试件在低应变率下面内经向和纬向拉伸实验所得到的 $\sigma-\epsilon$ 曲线。表 2 为实验所确定的材料力学性能参数，其中弹性模量为 $\sigma-\epsilon$ 曲线的初始切线模量。

表 2 Kevlar/乙烯基树脂 3D-OWC 拉伸实验的力学性能参数
Tab. 2 Mechanical property parameters of Kevlar/Vinyl of tensile trial

	应变率(/s)	弹性模量(GPa)	破坏应力(MPa)	破坏应变
经向拉伸	1.00E-03	16.12	347	0.029
	1.00E-02	18.35	390	0.023
纬向拉伸	1.00E-03	16.83	416	0.024
	1.00E-02	18.15	428	0.025

图 3 经向拉伸 σ - ϵ 曲线Fig. 3 σ - ϵ curve of tensile trial along warp yarn图 4 纬向拉伸 σ - ϵ 曲线Fig. 4 σ - ϵ curve of tensile trial along weft yarn

从实验结果可以看出:

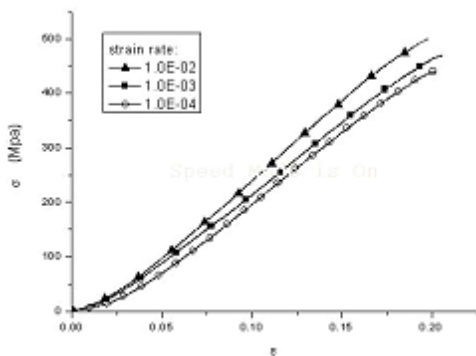
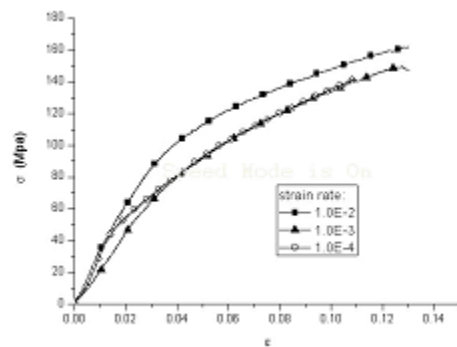
(1) 不论是经向还是纬向拉伸, σ - ϵ 关系都呈现出良好的类线性, 这是因为不论在经纱层还是纬纱层中, 纤维基本上是伸直的, 载荷主要作用在纤维上, 基体对承载的贡献比较小。

(2) 纬向的拉伸破坏强度比经向稍高一些, 这和文献[4]是一致的; 并且在经向拉伸时, σ - ϵ 曲线具有一定的应变率相关性, 而纬向拉伸则没有明显的应变率效应。这是因为 Kevlar 纤维在低应变率下为应变率不敏感材料^[11], 而纬向纤维受 Z 纱影响有限, 比经向纤维更趋于平直。因此在纬向拉伸时, 更多地体现了纤维本身的性能, 因而没有明显的应变率效应, 而且破坏强度比经向高; 但在经向拉伸时, 经向纤维受到了 Z 纱的影响, 试验结果体现了两者的耦合效应, 产生了一定的应变率相关性。

由于制作 z 向拉伸试件困难很大, 因而没有进行该方向上的拉伸试验。但有理由相信, Z 纱的存在将使得 3D-OWC 的 z 向拉伸强度要比相应的层合板高。

2.2 准静态压缩实验

图 5, 图 6 分别为不同应变率下 z 向压缩和面内压缩实验所得到的 σ - ϵ 曲线图。表 3 为根据压缩实验所得到的材料力学性能参数, 其中弹性模量为 σ - ϵ 曲线的初始切线斜率。

图 5 z 向压缩 σ - ϵ 曲线Fig. 5 σ - ϵ curve of compression along z direction图 6 面内压缩 σ - ϵ 曲线Fig. 6 σ - ϵ curve of compression of interface

从试验结果可以看出:

(1) 不论是 z 向压缩还是面内压缩, σ - ϵ 曲线都表现出非线性特征, 这和乙烯基树脂的非线性行为密切相关。另外, z 向压缩的 σ - ϵ 曲线呈现一定的应变率相关性, 而面内压缩没有明显的应变率效应, 其原因可能是由面内纤维受压发生屈曲失稳而导致。

(2) z 向压缩的破坏应力远大于面内的压缩破坏应力, 后者略大于乙烯基树脂的压缩破坏强度(见表 1)。分析其原因, 我们认为是 Z 纱起了重要作用。沿 z 向压缩时, 经纱层和纬纱层相互正交的纤维

束对于阻止试件发生剪切破坏具有积极的作用,使得其极限强度达到基体破坏强度的近 4 倍。然而在面内压缩时,由于 Z 纱并没有和经向/纬向纤维形成层层正交机织的结构,因此它对抵抗剪切破坏的作用没有面内纤维强。此外, z 向纤维含量低也是导致面内强度小的重要原因。因此要提高面内强度,除了改进 z 向纤维束的编织方式外,适当地提高 z 向纤维含量也是必要的。但对于实际工程应用而言,冲击载荷主要是沿 z 向作用在材料上的,因此 z 向的抗压强度是最主要的强度指标。

表 3 Kevlar/乙烯基树脂 3D-OWC 压缩实验的力学性能参数

Tab. 3 Mechanical property parameters of Kevlar/Vinyl of compression trial

压缩	应变率(/s)	弹性模量(GPa)	破坏应力(MPa)	破坏应变
z 向压缩	1.00E-04	2.34	416	0.212
	1.00E-03	2.58	440	0.206
	1.00E-02	2.65	488	0.198
面内压缩	1.00E-04	2.78	139	0.128
	1.00E-03	2.98	162	0.138
	1.00E-02	3.02	146	0.114

3 拉伸模量的估算

根据 3D-OWC 复合材料结构的特点,取一个周期性重复排列的最小单元作为代表性单元,并将其简化为图 7 所示的单胞模型。其中 1、2、3 分别表示经纱束、纬纱束和 Z 纱束,4、5 表示树脂基体, x、y、z 方向分别为经向、纬向和 z 向。设纤维束横截面为矩形,则三个方向的纤维体积比分别为:

$$\begin{aligned} V_{fx} &= b_2/(2b_1) \\ V_{fy} &= l_2/(2l_1) \\ V_{fz} &= (1 - 2V_{fx})(1 - 2V_{fy}) \end{aligned} \tag{1}$$

其中 l_1, b_1 分别表示单元 x、y 方向的尺度; b_2, l_2 分别表示单元内经纱束和纬纱束的宽度。

假设纤维束和基体均为线弹性材料,因此 3D-OWC 单元体也是线弹性的。由此我们可以根据力平衡条件和变形协调条件,由纤维束、基体的体积比以及它们各自的弹性模量求出单元的弹性模量。

设 x 向横截面上作用有应力 σ_x ,若以 $\sigma_{ix}(i=1, \cdots, 5)$ 分别表示图 7 所示单元第 i 组份沿 x 向的应力分量,则对图 7 所示的单胞而言有:

$$\sigma_x \cdot (b_1 \cdot 2h) = \sigma_{1x} \cdot (b_2 \cdot h) + \sigma_{2x} \cdot (b_1 \cdot h) + \sigma_{4x} \cdot ((b_1 - b_2) \cdot h) \tag{2}$$

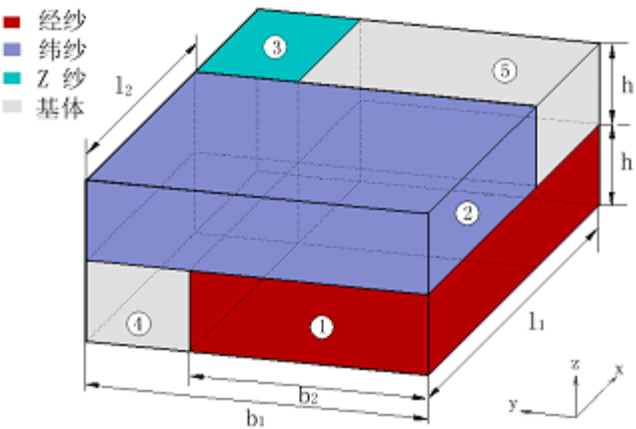


图 7 3D-OWC 单胞模型
Fig. 7 Unit cell model of 3D-OWC

对于纬向纤维束 2, 其 x 向的力平衡条件是:

$$\sigma_{2x} \cdot (b_1 \cdot h) = \sigma_{5x} \cdot (b_2 \cdot h) + \sigma_{3x} \cdot ((b_1 - b_2) \cdot h) \quad (3)$$

式中 σ_{3x}, σ_{5x} 分别表示 z 向纤维束 3 和基体 5 沿 x 向的应力分量。

设单元体的截面在变形过程中保持为平面, 则有变形协调条件:

$$\epsilon_x \cdot l_1 = \epsilon_{1x} \cdot l_1 = \epsilon_{2x} \cdot l_2 + \epsilon_{3x} \cdot (l_1 - l_2) \quad (4)$$

式中 $\epsilon_{1x}, \epsilon_{2x}, \epsilon_{3x}$ 分别表示经向纤维束 1, 纬向纤维束 2, z 向纤维束 3 沿 x 方向的应变分量。

由平截面条件:

$$\epsilon_{3x} = \epsilon_{5x}, \quad \epsilon_{2x} = \epsilon_{4x} \quad (5)$$

其中 $\epsilon_{4x}, \epsilon_{5x}$ 分别表示基体 4, 5 沿 x 方向的应变分量。

单元是线弹性的, 因此

$$\sigma_x = E_x \cdot \epsilon_x \quad (6)$$

纤维束和基体也是线弹性的, 故有:

$$\sigma_{1x} = E_{fl} \cdot \epsilon_{1x}, \quad \sigma_{2x} = E_{ft} \cdot \epsilon_{2x}, \quad \sigma_{3x} = E_{ft} \cdot \epsilon_{3x}, \quad \sigma_{4x} = E_m \cdot \epsilon_{4x}, \quad \sigma_{5x} = E_m \cdot \epsilon_{5x} \quad (7)$$

式中 E_m 表示基体杨氏模量; E_{fl} 和 E_{ft} 分别表示纤维束纵向和横向的杨氏模量。

联立解(2)~(7), 并利用公式(1), 可以得到:

$$E_x = E_{fl} V_{fx} + \frac{E_m^2 V_{fx} (1 - 2V_{fx}) + E_{ft} E_m (\frac{1}{2} - V_{fx} + 2V_{fx}^2) + \frac{1}{2} E_{ft}^2 (1 - 2V_{fx})}{E_{ft} (1 - 4V_{fx} V_{fy}) + 4E_m V_{fx} V_{fy}} \quad (8)$$

同理可得:

$$E_y = E_{fl} V_{fy} + \frac{E_m^2 V_{fy} (1 - 2V_{fy}) + E_{ft} E_m (\frac{1}{2} - V_{fy} + 2V_{fy}^2) + \frac{1}{2} E_{ft}^2 (1 - 2V_{fy})}{E_{ft} (1 - 4V_{fx} V_{fy}) + 4E_m V_{fx} V_{fy}} \quad (9)$$

$$E_z = E_{fl} V_{fz} + \frac{8E_{ft}^2 V_{fx} V_{fy} + 4E_{ft} E_m V_{fx} (1 - 2V_{fy}) (1 + 2V_{fx}) + 4E_m^2 V_{fx} V_{fz}}{E_{ft} (1 + 2V_{fx}) + E_m (1 - 2V_{fx})} \quad (10)$$

由于纤维束纵向杨氏模量 E_{fl} 要比横向模量 E_{ft} 大一个数量级 (见表 1), 式(8)~(10)指出, 等式右边的首项是主项, 因此 i 方向的纤维束是该方向单元杨氏模量 E_i 的主要贡献者, 同时其还与基体的弹性模量及其他两个方向纤维的横向弹性模量和体积比有关。

Тарнопольский^[12]在研究三维正交复合材料时, 曾利用平均化方法提出过一种计算三维正交复合材料杨氏模量的方法, 其基本思想是将三维复合材料通过修正的基体模型化成二维结构, 然后获得模量计算公式 (称之为基体修正法):

$$E_i = V_i E_f + \frac{E_m (1 + V_k) [(1 - V_i - V_j)^2 V_i + ((1 + V_i + V_j) V_j)]}{(1 - V_k) (1 - V_i - V_j) (V_i + V_j)} \quad (11)$$

其中 E_f, E_m 分别为纤维和基体的弹性常数, $i, j, k \in \{x, y, z\}$, 且 $i \neq j \neq k$, V_i 是 i 方向纤维体积比。

蔡敢为^[9]在研究三维正交纤维复合材料时提出过一个单胞模型, 即在单位体积内将 x, y, z 三向的纤维体积比作为三组纤维束的横截面面积大小, 与本文类似的思想导出了一组表达式较为复杂的模量估算公式。他给出的 x 向杨氏模量计算公式为 (其余二方向类似):

$$E_x = V_{fx} E_{fl} + \frac{\sqrt{V_{fz}} (1 - \sqrt{V_{fy}}) E_{ft} E_m}{(1 - \sqrt{V_{fz}}) E_{ft} + \sqrt{V_{fz}} E_m} + \frac{\sqrt{V_{fy}} (1 - \sqrt{V_{fz}}) E_{ft} E_m}{(1 - \sqrt{V_{fy}}) E_{ft} + \sqrt{V_{fy}} E_m} + \frac{\sqrt{V_{fy}} \sqrt{V_{fz}} E_{ft} E_m}{(\sqrt{V_{fy}} + \sqrt{V_{fz}}) E_m + (1 - \sqrt{V_{fy}} - \sqrt{V_{fz}}) E_{ft}} + [(1 - \sqrt{V_{fy}}) (1 - \sqrt{V_{fz}}) - V_{fx}] E_m \quad (12)$$

取表 1 中的相关数据, $E_m = 3.28 \text{ GPa}$, $E_{fl} = 70 \text{ GPa}$, $E_{ft} = 6.2 \text{ GPa}$, 并令 $V_{fx} = V_{fy} = 0.25$, $V_{fz} = 0.1$, 分别代入(8)~(12)式可得三种方法的弹性模量, 如表 4 所示。可见本文和文献[9]的估算结果接近, 优于基体修正法, 而本文公式要比文献[9]方法简洁。

表 4 各种模型估算结果对比
Tab.4 Comparison of different models

	基体修正法	文献[9]	本文	实验值
E_x	24.46GPa	20.71GPa	20.89GPa	18.35GPa
E_y	23.28GPa	20.71GPa	20.89GPa	18.15GPa
E_z	16.13GPa	10.22GPa	10.24GPa	—

4 结束语

开展了 Kevlar/乙烯基树脂 3D-OWC 低应变率下的力学性能实验研究。研究表明,经向拉伸和 z 向压缩时,材料具有一定的应变率效应。 z 向压缩强度远大于面内压缩强度,而面内经向拉伸和纬向拉伸的强度则相当。提出并建立了一种可分析三维正交机织复合材料力学性能的单胞模型,导出了一组估算 3D-OWC 材料拉伸模量的公式,估算结果优于基体修正法,而与文献[9]相近,但更为简单明了,更适合于工程应用。

参考文献:

[1] 洗杏娟. 纤维增强复合材料的破坏机理[J]. 力学进展,1986,25(5):229—235 (Xian Xing-juan. Damage Mechanism of Fiber-reinforced Composite. Advances in Mechanics, 1986, 25 (5): 229—235(in Chinese))

[2] Antonio Miravete. 3D textile reinforcements in composite materials[M]. CRC Press, 1999.

[3] Cox B N, Daskhah M S, et al. Failure mechanisms of 3D woven composite in tension, compression and bending[J]. Acta Metall Mater,1994,42(12):3967—84.

[4] Ping Tan, Liyong Tong, et al. Behavior of 3D orthogonal woven CFRP composites[J]. Experiment Investigation, Composite; Part A,2000, 31:259—281.

[5] Ping Tan, Liyong Tong, et al. Micromechanics models for the elastic constants and failure strengths of plain weave composites[J]. Composite Structures, 1999,47: 797—804.

[6] Wen-Shyong Kuo, et al. Effect of weaving processes on compressive behavior of 3D woven composites[J]. Experiment Investigation, Composites; Part A, 2007,38:555—565.

[7] Yunsong Luo, Bohong Gu, et al. Transverse impact behavior and energy absorption of three-dimensional orthogonal hybrid woven composites[J]. Comp. Stru. , 2007,81:202—209.

[8] 吴华利,王钧,杨小利,等. 三维正交机织复合材料的力学性能[J]. 高科技纤维与应用,2007,24(4):19—22 (WU Hua-li, WANG Jun, YANG Xiao-li, et al. Tensile and Flexural Properties of 3D Orthogonal Woven Composites. Hi-Tech Fiber & Application, 2007, 24(4):19—22(in Chinese))

[9] 蔡敢为,陆俊华,廖道训. 三维正交纤维复合材料弹性性能细观力学分析[J]. 华中理工大学学报,1996,4:67—70 (Cai Ganwei, Lu Junhua, Liao Daoxun. A Micromechanics Analysis of the Elastic Properties of 3-D Orthogonal Woven Fabric Reinforced Composites. J. Huangzhong Univ. of Sci. & Tech, 1996,4: 67—70(in Chinese))

[10] GB/T 1040.4—2006. 塑料 拉伸性能的测定 第 4 部分:各向同性和正交各项异性纤维增强复合材料的试验条件 [S] (GB/T 1040. 4—2006Plastics-Determination of tensile properties-Part4: Test conditions for isotropic and orthogonal fiber-reinforced plastic composites(in Chinese))

[11] 汪洋,夏源明. 不同应变率下 Kevlar49 纤维束拉伸力学性能的试验研究[J]. 复合材料学报,1999,2:45—51 (Wang Yang, Xia Xuanming. Experimental Study of the Tensile Mechanical Behavior of Kevlar49 Fiber Bundles under Different Strain-rates. Acta Materiae Compositae Sinica, 1999, 2: 45—51(in Chinese))

[12] Тарнопольский Ю М. Elastic Mechanical Properties of 3D Orthogonal Fiber-reinforced Composite[J]. Polymer Mechanics, 1973, (5):853 —860

Experiment Study of Mechanical Properties of 3D Orthogonal Woven Composite

YU Yu-miao, WANG Xiao-jun, WANG Zhi-hai, LI Yong-chi

(Department of Modern Mechanics, USTC, Hefei, Anhui, 230027, China)

Abstract: Mechanical properties of 3D orthogonal woven Kevlar/vinyl composite were studied by a series of tests on MTS (Material Test System). The experiment results indicate that the tensile strength along the warp yarns and the compression strength along the thickness direction have certain strain rate effect, and the compression strength along the thickness is much higher than the strength in the plane, but the tensile strength along warp yarn and weft yarn are almost same. Some necessary qualitative analyses about these phenomena were carried out, considering the textile fiber style. Finally, according to the structure characters of the 3D-OWC (Orthogonal Woven Composite), a group of formula to estimate the Young's Module, and the estimated values are in good agreement with the experimental values.

Keywords: 3D orthogonal woven composite; Kevlar; Young's Module