



2.5 维机织复合材料的几何结构模型与验证

曹海建, 钱 坤, 盛东晓

(江南大学 纺织服装学院, 江苏 无锡 214112)

摘 要 为验证 2.5 维机织复合材料结构与其力学性能的关系, 基于对材料断面显微照片的观察和分析, 假定纤维束截面为跑道形, 建立了 2.5 维机织复合材料的单元结构模型。借助模型推导出纱线在几种典型结构(浅交弯联、浅交直联、深角联)的单元体结构内的纱线长度、接结经的取向角和纤维体积分数, 并对材料进行拉伸、压缩性能预测。制作了满足要求的 2.5 维机织复合材料试验件并对其进行力学性能测试, 通过试验值和预测值的对比, 验证几何模型的正确性。

关键词 纤维体积分数; 2.5 维机织复合材料; 力学性能; 结构模型; 取向角

中图分类号: TB 332 文献标志码: A

Geometry model and experimental verification of 2.5-D woven composites

CAO Haijian, QIAN Kun, SHENG Dongxiao

(College of Textile and Clothing, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214112, China)

Abstract In order to validate the relationship between structure and mechanical properties of 2.5-D woven fabric composites, the unit cell geometry model of 2.5-D woven composites was built by adopting the assumption of raceway fibers on the basis of the micrograph observation and analysis of the fabric section. The geometry model formular is used to deduce the length of yarns, the orientation angle of the nodulated yarns and the fiber volume content on some typical 2.5-D woven composites, such as shallow curve-linking structures, shallow straight-linking ones, and deep angle-linking ones, and tensile strength and compress strength of the composites are forecated. Experimental samples of meeting the need of 2.5-D woven composites are made and experiments are performed. Theoretical predictions agree well with the experimental results, thus the proposed model is verified.

Key words fiber volume content; 2.5-D woven composites; mechanical property; geometry model; oriental angel

近年来,复合材料在汽车、飞机、航天器中的应用从次承力构件逐渐发展到主承力构件,因而,人们对三维织物复合材料的关注越来越多。复合材料的预制件——三维织物可以用多种方法形成。如机织法、针织法、编织法等^[1-3]。2.5 维机织复合材料是三维复合材料的一个重要分支,其最大特点是纱线沿与织物厚度方向呈一定角度的方向配置,从而增强了织物层间连接强度。2.5 维机织复合材料本身又包括多种多样的结构。如浅交弯联、浅交直联、深角联等,再配合纤维原料、粗细、织物密度、织造张力

及复合材料,可满足不同的力学性能要求^[4-6]。

随着三维机织复合材料应用的日益广泛,深入研究其细观结构显得尤为重要。目前,国外对此已作了一定的研究工作,并有些公开发表的论文^[7-11],但这些分析模型都是研究某一特定结构对材料力学性能的影响,存在一定的局限性。本文基于对 2.5 维机织复合材料断面显微照片的观察和分析,假定纱线截面为跑道形,建立了具有普遍适用意义的单元结构几何模型。利用模型推导出材料在 1 个结构单元内的长度、取向角等参数值,并通过试验验证了

模型的正确性。

1 2.5 维机织复合材料细观几何结构

1.1 2.5 维机织复合材料细观结构介绍

2.5 维机织结构是靠接结纱线在织物的厚度方向上将若干层重叠排列的二维机织结构接合起来,使之成为整体性能良好的 2.5 维结构。典型的 2.5 维机织结构如图 1 所示。图 1(a)、(b)为角联接结的 2.5 维机织结构,在该类结构中,所有的接结经纱沿对角方向依次穿过相邻的 2 列和 2 行纬纱;图 1(c)为正交接结的 2.5 维机织结构,在该类结构中,所有的接结经纱沿厚度方向在相邻的 2 列纬纱中穿过^[12]。

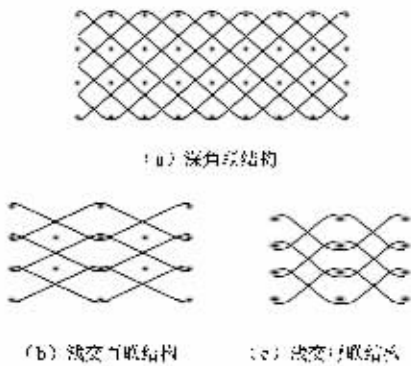


图 1 2.5 维机织复合材料结构示意图

Fig.1 Structure display of 2.5-D woven composite.

(a) Deep angle-link structure; (b) Shallow straight-link structure; (c) Shallow curve-link structure

1.2 经纱截面形状提取

采用示踪法与 MatLab 图像处理技术确定 2.5 维机织复合材料纱线截面和轨迹。为了获得纱线截面形状,需对材料进行多次切片,如图 2(a)、(b)所示。将每次切片后的 2.5 维机织复合材料进行照片采集,利用 MatLab 将图像二值化,再通过编写的程序提取二值化后的图像轮廓即可得到经纱的走向曲线及截面形状,如图 2(c)、(d)所示。由图 2 可知,2.5 维机织复合材料经纱截面可视为 1 个矩形与 2 个半圆形组合而成,因此,本文采用跑道形假设进行分析计算。

1.3 基本假设

图 3 示出 2.5 维机织物接结经纱的几何形态。

为定量描述织物的细观几何结构,结合上面的分析,采取如下假设。

1)经、纬纱线均采用跑道形假设,在相邻上下

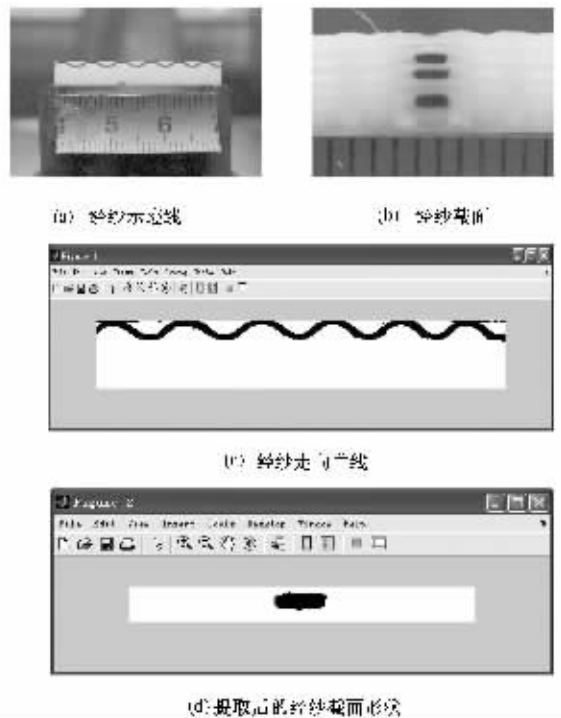


图 2 经纱截面形状提取

Fig.2 Extracing of section shape on warp. (a) Section trace line shape of warp; (b) Section shape of warp; (c) Trend curve of warp; (d) Section shape of extracted warp

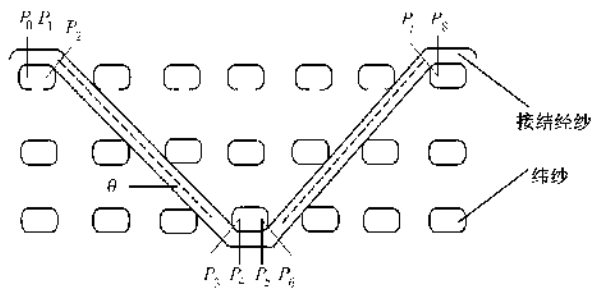


图 3 重复单元中接结经纱沿轴向的几何形态

Fig.3 Geometry configuration of binder along axis direction in repeat unit

2) 根纬纱之间,经纱呈紧密排列状态;2) 纬纱轴线为直线,经纱的轴线分为 2 段:一段是与纬纱密切接触的曲线段,另一段是直线段;3) 在织物各处纱线束的截面形状保持不变且纤维排列均匀;4) 在同一织物中经、纬纱线束的变形率一致。

2 结构单元几何参数

2.1 接结经纱长度与经纱取向角

由图 3 知,在结构单元中,接结经纱在长度方向可分为 8 段,其中 P_0P_1 、 P_2P_3 、 P_4P_5 和 P_6P_7 为直

线段, P_1P_2 、 P_3P_4 、 P_5P_6 和 P_7P_8 为圆弧段。在 1 个结构单元中, 接结经纱的长度 L_b 是上述直线段和圆弧段的总和。

$$L_b = \sum_{m=0}^7 P_m P_{m+1} \quad (1)$$

2.1.1 角联接结经纱长度

角联接结结构的几何模型如图 4 所示, 其接结经纱长度可通过式(2)计算。

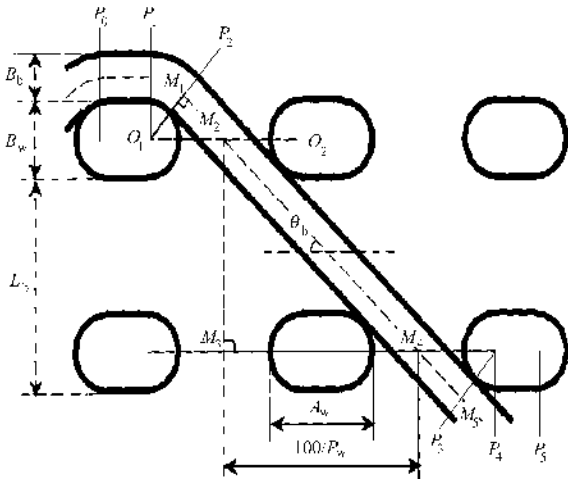


图 4 角联接结结构的几何模型

Fig.4 Geometry model of angle-link structure

接结经纱直线段长度 $P_0P_1 = P_4P_5 = A_w - B_w$;

接结经纱圆弧段长度 $P_1P_2 = P_3P_4 = \frac{1}{2}(B_w + B_b)\theta_b$;

接结经纱斜直线段长度 $P_2P_3 = M_1M_2 + M_2M_4 + M_4M_5$ 。其中

$$M_1M_2 = M_4M_5 = \frac{O_1M_1}{\tan\theta_b} = \frac{\frac{1}{2}(B_w + B_b)}{\tan\theta_b}$$

$$M_2M_4 = \frac{M_3M_4}{\cos\theta_b} = \frac{100(n_{ft} - 1)}{P_w \cos\theta_b}$$

所以, 接结经纱斜直线段长度

$$P_2P_3 = M_1M_2 + M_2M_4 + M_4M_5 = \frac{B_w + B_b}{\tan\theta_b} + \frac{100(n_{ft} - 1)}{P_w \cos\theta_b}$$

将上述数据代入式(1), 得到角联接结结构经纱长度

$$L_b = \sum_{m=0}^7 P_m P_{m+1} = 2 \left[A_w - B_w + \left(\theta_b + \frac{1}{\tan\theta_b} \right) (B_w + B_b) + \frac{100(n_{ft} - 1)}{P_w \cos\theta_b} \right] \quad (2)$$

式中: A 、 B 为纱线(接结经纱、纬纱)截面的长、短直径, 下标 w 和 b 分别表示纬纱和接结经纱, A_w 为纬

纱的长直径; B_w 为纬纱的短直径; B_b 为经纱的短直径; θ_b 为接结经纱的取向角; n_{ft} 为接结深度, 即接结经纱在织物厚度方向所穿越过的纬纱行数; P_w 为纬密, 根/10 cm。

2.1.2 正交接结经纱长度

正交接结结构的几何模型如图 5 所示, 其接结经纱长度可通过(3)式计算。

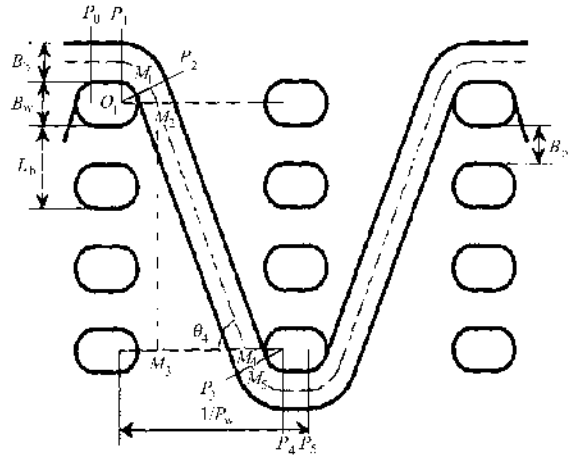


图 5 正交接结结构的几何模型

Fig.5 Geometry model of orthogonal-link structure

接结经纱直线段长度 $P_0P_1 = P_4P_5 = A_w - B_w$;

接结经纱圆弧段长度 $P_1P_2 = P_3P_4 = \frac{1}{2}(B_w + B_b)\theta_b$;

接结经纱斜直线段长度 $P_2P_3 = M_1M_2 + M_2M_4 + M_4M_5$ 。其中

$$M_1M_2 = M_4M_5 = \frac{O_1M_1}{\tan\theta_b} = \frac{\frac{1}{2}(B_w + B_b)}{\tan\theta_b}$$

$$M_2M_4 = \frac{M_2M_3}{\sin\theta_b} = \frac{(n_{ft} - 1)(B_w + B_b)}{\sin\theta_b}$$

所以, 接结经纱斜直线段长度

$$P_2P_3 = M_1M_2 + M_2M_4 + M_4M_5 = \frac{B_w + B_b}{\tan\theta_b} + \frac{(n_{ft} - 1)(B_w + B_b)}{\sin\theta_b}$$

将上述数据代入式(1), 得到正交接结结构经纱长度

$$L_b = \sum_{m=0}^7 P_m P_{m+1} = 2 \left[A_w - B_w + (B_w + B_b) \left(\theta_b + \frac{n_{ft} - 1 + \cos\theta_b}{\sin\theta_b} \right) \right] \quad (3)$$

2.1.3 接结经纱取向角

根据接结经纱的几何形态, 还可计算出接结经斜向纱段的取向角。对于角联接结结构(如图 4 所

示),因为

$$\sin\theta_b = \frac{O_1 M_1}{O_1 M_2} = \frac{\frac{1}{2}(B_w + B_b)}{\frac{1}{2}\left(\frac{100}{P_w} - A_w + B_w\right)}$$

接结经纱的取向角

$$\theta_b = \arcsin\left(\frac{B_w + B_b}{100/P_w - A_w + B_w}\right) \quad (4)$$

2.2 纤维体积分数

根据组成2.5维机织结构各纱线系统的纱线长度和取向角,若给定各系统中的纱线根数并已知纱线的截面积,就可以通过式(5)来估计复合材料的纤维体积分数,即通过组成机织结构单元各纱线系统的纤维体积之和与结构单元的体积之比给出纤维的体积分数,即:

$$V_f = \frac{(V_b + V_w)K}{V} \times 100\% = \frac{(n_b L_b S_b + n_w L_w S_w)K}{L_x L_y L_z} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $L_x = 100n_{fd}/P_w$, $L_y = 100n_c/P_j$, $L_z = L_h(n_f - 1) + 2B_b + B_w$; n 为纱线根数; L 为纱线长度, mm; S 为纱线截面积, mm^2 ; k 为纱线的纤维填充因子, %; L_x 、 L_y 、 L_z 为结构单元的尺寸, mm; L_h 为相邻2根纬纱在厚度方向上的距离, mm; n_f 为纬纱沿厚度方向上的根数,即纬纱的层数。

2.3 几何参数与性能预测

本文选用了3种2.5维机织复合材料(浅交弯联、浅交直联、深角联)进行研究。从每种结构的复合材料板材中各取5个试样,采用GB 1463—1988推荐的测试方法,获得试样的纤维体积分数。表1中列出了对复合材料试样的纤维体积分数测试结果。为便于比较,由式(5)所计算的模型预测值也同表列出。

表1 2.5维机织复合材料纤维体积分数

Tab.1 Fiber volume content of 2.5-D woven composites

结构类型	体积分数/%	
	预测值	测试值
浅交弯联	42.6	41.7
浅交直联	37.1	33.9
深角联	29.7	28.1

由式(4)结合表1知:1)对于相同层数(4层)2.5维机织复合材料,接结经纱取向角 θ_b 大小关系为浅交弯联 > 浅交直联 \approx 深角联;2)纤维体积分数大小关系为浅交弯联 > 浅交直联 > 深角联。

从纤维增强的角度出发,决定2.5维机织复合材料力学性能的2个重要因素是纤维的取向(接结经纱取向角 θ_b)和纤维体积分数^[12]。2.5维机织复合材料的强度公式^[12-14]为

$$\sigma_{ic} = V_f \sigma_f + V_m \sigma_m = V_f \sigma_f + (1 - V_f) \sigma_m \quad (6)$$

$$\sigma_f = \frac{n_y \sigma_y A_y \cos\theta_b}{A_f} \quad (7)$$

式中: σ_{ic} 表示2.5维机织复合材料的强度; σ_f 为2.5维机织复合材料的织物强度; σ_m 为树脂的强度; σ_y 为纤维束的强度; V_f 表示纤维体积分数; V_m 为树脂体积分数; n_y 为整个织物截面上的纤维束的数目; A_y 表示纤维束的横截面积; A_f 为织物的横截面积。

对于本文试验中的3类2.5维机织复合材料,式(6)、(7)中的参数 n_y 、 σ_y 、 A_y 、 A_f 和 σ_m 基本是相同的,因此公式可简化为: $\sigma_{ic} \sim k \cos\theta_b V_f$ 。由此结合表1和接结经纱取向角 θ_b ,可以预测上述3种材料的拉伸、压缩性能关系为浅交直联 > 深角联 > 浅交弯联。

3 试验研究

3.1 试件基本参数

本文选用了3种2.5维机织复合材料(浅交弯联、浅交直联、深角联)进行力学性能对比试验研究,试件制作过程严格按照有关标准进行,保证了试验结果的可靠。所用织物的参数:经密70根/10cm,纬密30根/10cm。树脂选用环氧618,固化剂采用苯二甲胺,增塑剂用邻苯二甲酸二丁酯。树脂基体的配方质量比为100:20:10(环氧树脂:固化剂:增塑剂),采用RTM冲模工艺制备试验件。

3.2 试验标准与设备和内容

3.2.1 试验标准

目前尚无三维机织复合材料力学性能的测试标准,本文参照GB/T 1447—1983《玻璃纤维增强塑料拉伸性能试验方法》、GB/T 5258—1985《玻璃纤维增强塑料薄层板压缩性能试验方法》进行测试。

3.2.2 试验设备

试验使用WDW-E2000微机控制电子万能试验机进行。采用位移控制加载,对于拉伸、压缩试验,加载速率为2mm/min。应变数据利用YJ-33数字应变仪采集。试验结果根据相应标准处理。

4 结果与分析

3 种复合材料的力学性能试验结果见表 2。数据为 10 个试样的平均值。

表 2 2.5 维机织复合材料拉伸、压缩性能指标

Tab.2 Tensile and compress index of 2.5-D woven composites

结构类型	拉伸		压缩	
	载荷/kN	强度/MPa	载荷/kN	强度/MPa
浅交直联	23.936	119.49	4.496	86.73
深交联	23.307	90.14	3.981	77.36
浅交弯联	23.434	87.508	3.294	74.01

由式(4)结合表 1、2 可知: 1) 对于浅交直联、深角联结构的 2.5 维复合材料接结经纱倾角 θ_0 近似相等, 纤维体积含量浅交直联 > 深角联, 经向拉伸、压缩强度浅交直联 > 深角联。说明 2.5 维机织复合材料在接结经纱倾角相等的前提下, 材料经向拉伸、压缩性能随着纤维体积分数的增加而增加。

2) 对于浅交弯联、浅交直联结构的 2.5 维复合材料, 接结经纱倾角浅交弯联 > 浅交直联, 纤维体积含量浅交弯联 > 浅交直联, 经向拉伸、压缩强度浅交弯联 < 浅交直联。说明 2.5 维机织复合材料受接结经纱倾角的影响比纤维体积含量要大, 材料经向拉伸、压缩性能随着接结经纱倾角的增大而减小。

3) 对于相同厚度的 2.5 维机织复合材料经向拉伸、压缩强度均表现为浅交直联 > 深角联 > 浅交弯联, 同时材料的经向压缩强度明显小于拉伸强度。这主要是因为试件受压缩破坏的同时还存在着剪切破坏。通过观察压缩试件的破坏形式, 可以发现有明显的剪切破坏痕迹。

5 结论

1) 2.5 维机织复合材料在织物密度、纤维规格、层数相同的情况下, 3 种结构纤维体积分数的大小关系为浅交弯联 > 浅交直联 > 深角联; 3 种结构接结经纱倾角大小关系为深角联 \approx 浅交直联 < 浅交弯联。

2) 相同层数的 3 种 2.5 维机织结构复合材料的拉伸、压缩强度均表现为浅交直联 > 深角联 > 浅交弯联; 且压缩强度明显小于拉伸强度。

3) 2.5 维机织复合材料在接结经纱倾角相等的前提下, 材料经向拉伸、压缩性能随着纤维体积分数的增加而增加。

4) 2.5 维机织复合材料受接结经纱倾角的影响比纤维体积分数要大, 材料经向拉伸、压缩性能随着接结经纱倾角的增大而减小。

FZXB

参考文献:

- [1] BYUN J H, CHOU T W. Elastic properties of three-dimensional angle-interlock fabric preforms[J]. J Text Inst, 1990, 81(4): 538 - 548.
- [2] WHITNEY T J, CHOU T W. Modeling of 3-D angle-interlock textile structural composites [J]. Journal of Composite Materials, 1989, 123: 809 - 911.
- [3] COX B N, DADKHAH M S. The macroscopic elasticity of 3-D woven composites[J]. Journal of Composite Materials, 1995, 29(6): 785 - 819.
- [4] 杨彩云, 李嘉禄. 复合材料用 3D 角联锁结构预制件的结构设计及新型织造技术[J]. 东华大学学报, 2005, 31(5): 53 - 58.
YANG Caiyun, LI Jialu. The structural design and new weaving technique of 3-D angle-interlock preforms for composites [J]. Journal of Donghua University, 2005, 31(5): 53 - 58.
- [5] 聂建斌, 卢士艳. 角联锁织物的组织设计[J]. 纺织学报, 2006, 27(3): 90 - 91.
NIE Jianbin, LU Shiyan. Construction of angle-interlock woven fabrics [J]. Journal of Textile Research, 2006, 27(3): 90 - 91.
- [6] 卢士艳, 聂建斌. 角度联锁三维机织物的设计与生产[J]. 棉纺织技术, 2005, 33(2): 8 - 11.
LU Shiyan, NIE Jianbin. Design and development of angle-interlock 3-D woven fabric [J]. Cotton Textile Technology, 2005, 33(2): 8 - 11.
- [7] PEIRCE F T. The geometry of cloth structure [J]. J Text Inst, 1937, 28(3): 45 - 96.
- [8] KO F K, DU G W. Processing of textile preforms [M]// GUTOWSKI T G. Advanced Composites Manufacturing. New York: John Wiley & Sons Inc, 1997: 182 - 187.
- [9] HARTRANFT D, MAJIDI A P, CHOU T W. Modeling and characterization of through-thickness 3-D woven composites [J]. NASA CP-3311, Part 2, 1995: 251 - 270.
- [10] COX B N, DADKBAH M S. The macroscopic elasticity of 3-D woven composites [J]. J Comp Mater, 1995, 29(6): 785 - 819.
- [11] TAN P, TONG L, STEVEN G P. Modeling approaches for 3-D orthogonal woven composites [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1998, 17(6): 545 - 577.
- [12] 丁辛, 易洪雷. 三维机织结构的几何模型 [J]. 复合材料学报, 2003, 20(5): 108 - 113.
DING Xin, YI Honglei. A geometric model of three dimensional woven structures [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2003, 20 (5): 108 - 113.

开裂、纤维抽拔和断裂。

3 结 论

1)三维编织复合材料的编织结构对冲击性能的影响较大,不同编织结构对冲击的响应不同,生产过程中可以根据实际应用的需要设计不同的编织结构参数。

2)用相似的初始冲击能量进行冲击时,与四向和五向编织结构材料相比,三维六向编织结构复合材料发生主要损伤时所需的冲击载荷和冲击能量较大,主要损伤持续时间最短,吸收的能量最少,造成的损伤最小。

3)三维编织复合材料的低速冲击破坏模式主要有基体开裂、纤维基体脱粘、纤维断裂和穿透破坏。

FZXB

参考文献:

- [1] 沈怀荣. 三维编织复合材料冲击实验与分析[J]. 装备指挥技术学院学报, 2002, 13(2): 84 - 87.
SHEN Huairong. Impact experiment and analysis of three braided composite materials [J]. Journal of Institute of Command and Technology of Equipment, 2002, 13(2): 84 - 87.
- [2] 魏伯荣, 蒋海滨, 李名琦. 锥体冲击芳纶复合材料的损伤及其机理研究[J]. 航空材料学报, 2001, 21(1): 47 - 50.
WEI Borong, JIANG Haibin, LI Mingqi. Study of circular impact to kevlar composites and mechanism [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2001, 21(1): 47 - 50.
- [3] 练军, 顾伯洪, 王善元. 织物及其复合材料的弹道冲击性能[J]. 纺织学报, 2006, 27(8): 109 - 112.

LIAN Jun, GU Bohong, WANG Shanyuan. Ballistic impact properties of the fabric and its composite laminates [J]. Journal of Textile Research, 2006, 27(8): 109 - 112.

- [4] JENQ S T, KUO J T, SHEU L T. Ballistic impact response of 3-D four-step braided glass/epoxy composites [J]. Key Engineering Materials, 1998, 141 - 143: 349 - 366.
- [5] 顾伯洪, 徐静怡. 三维编织复合材料弹道侵彻准细观层次有限元分析[J]. 复合材料学报, 2004, 21(3): 84 - 90.
GU Bohong, XU Jingyi. Finite element calculation of a 3-D braided composite under ballistic penetration at quasi-microstructure hierarchy [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(3): 84 - 90.
- [6] 徐静怡, 顾伯洪. 编织复合材料弹道冲击破坏形式及模式[J]. 弹道学报, 2002, 14(2): 39 - 43.
XU Jingyi, GU Bohong. Damage pattern and failure mode of 3-D braided composites under ballistic impact [J]. Journal of Ballistics, 2002, 14(2): 39 - 43.
- [7] MAJIDI A P, YANG Jenming, CHOU Tsuwei. Mechanical behavior of three-dimensional braided metal matrix composites [C]//Testing Technology of Metal Matrix Composites. USA: ASTM, STP 964, 1988: 31 - 47.
- [8] PORTANOVA M A. Fatigue resistance of un-notched and post-impact 3-D braided composites, N 94-27433 [R]. [s.l.]: [s.n.], 1994.
- [9] WAN Y Z, CHEN G C, HUANG Y, et al. Characterization of three dimensional braided carbon/Kevlar hybrid composites for orthopedic usage [J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 398: 227 - 232.
- [10] SHYR Tienwei, PAN Yuhao. Impact resistance and damage characteristics of composite laminates [J]. Composite Structures, 2003, 62: 193 - 203.
- [11] RICHARDSON M O W, WISHEART M J. Review of low-velocity impact properties of composite materials [J]. Composites Part A, 1996, 27A: 1123 - 1131.

(上接第 62 页)

- [13] 汪蔚. 3D 机织物增强复合材料板的力学性能[J]. 纺织学报, 2003, 24(5): 49 - 51.
WANG Wei. Mechanical property of 3-D woven composites [J]. Journal of Textile Research, 2003, 24(5): 49 - 51.

- [14] 燕瑛. 纺织结构复合材料强度性能的研究[J]. 北京航空航天大学学报, 1996, 22(6): 707 - 711.
YAN Ying. Study on the strength of textile structural composites [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1996, 22(6): 707 - 711.