**文章编号:** 1671-0444(2018)06-0868-08

# 三维编织复合材料横向冲击变形与细观结构关系

李冰珂<sup>a, b</sup>, 王 磊<sup>a, b</sup>, 刘 涛<sup>a, b</sup>, 孙宝忠<sup>a, b</sup>

(东华大学 a. 纺织学院;b. 纺织面料技术教育部重点实验室,上海 201620)

# Relationships between Transverse Impact Deformation and Microstructure of 3D Braided Composites

LI Bingke<sup>a, b</sup>, WANG Lei<sup>a, b</sup>, LIU Tao<sup>a, b</sup>, SUN Baozhong<sup>a, b</sup>

(a. College of Textiles; b. Key Laboratory of Textile Science & Technology, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: The transverse impact experiments of three-dimensional four-directional (3D4D) and threedimensional five-directional (3D5D) braided composites were conducted on a modified split Hopkinson pressure bar (SHPB) testing system. In order to investigate the effects of microstructures on transverse impact deformation, we recorded impact deformations and damages under transverse impact loading by high speed camera. The results show that 3D5D braided composites could undertake higher impact load while the impact deformation is smaller than that of 3D4D braided composites. The main failure mode of 3D5D material is matrix crack and fiber breakages for 3D4D braided composites. Due to the presence of straight axial yarns in 3D5D braided composite, the stress spreads along the axial direction, thus obtaining the improved anti-impact performance.

Key words: 3D braided composites; impact deformation; transverse impact; high speed photography technology

三维编织复合材料具有良好的可设计性和结构 完整性,尤其是其厚度方向上的增强从根本上克服 了层合板层间结合力差、易分层等缺陷,广泛应用于 结构工程领域<sup>[1]</sup>。研究三维编织复合材料在高速冲

作者简介:李冰珂(1993—),女,河南新乡人,硕士研究生,研究方向为纺织复合材料冲击动力学,E-mail:libingke1993@163.com 孙宝忠(联系人),男,教授,E-mail: sunbz@dhu.edu.cn

**收稿日期:** 2017-07-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675095)

击下变形与细观结构的关系,对抗冲击三维编织复 合材料的结构和性能设计有重要意义,是材料动态 力学性能研究的一个重要方向。

近年来,国内外学者对三维编织复合材料冲击 动力学行为研究的报道较多。Majidi 等<sup>[2]</sup>研究了三 维编织和单向 FP/AL-Li 复合材料冲击力学行为。 Sun 等<sup>[3]</sup>研究了应变率对三维编织复合材料面内和 面外冲击压缩失效行为的影响。Zhang 等<sup>[4]</sup>通过频 域分析方法对三维矩形编织复合材料进行横向冲击 和低速冲击测试,研究了材料能量吸收和破坏机制。

细观结构对三维编织复合材料力学性能影响显 著。卢子兴等<sup>[5]</sup>对三维四向(3D4D)和三维五向 (3D5D)编织复合材料进行了弯曲试验,发现轴纱的 加入对 3D5D 编织复合材料变形机制影响显著。 Liu 等<sup>[6]</sup>比较了 3D4D 和 3D5D SiO<sub>2f</sub>/SiO<sub>2</sub> 编织复 合材料拉伸、弯曲和剪切力学性能,结果表明 3D5D 编织复合材料断裂强度和断裂韧性明显高于 3D4D 编织复合材料。Li 等<sup>[7-9]</sup> 通过建立 3D5D 编织三单 胞模型来预测 3D5D 几何结构特征以及强度和刚度 等力学性能,并在此基础上采用分离式霍普金森压 杆(SHPB)技术对 3D5D 碳/酚醛编织复合材料进行 横向压缩测试,探究应变率效应对材料动态性能的 影响。Zhou 等<sup>[10-12]</sup>通过试验和有限元模型相结合 的方法,研究了编织角、编织层数、轴纱等结构效应 对三维圆管编织复合材料力学性能影响,进一步揭 示材料细观结构损伤失效机理。然而,上述研究主 要采用试验及有限元方法来探究材料破坏机制,并 未利用高速摄影技术捕捉材料在加载过程中的真实 破坏和损伤扩展全过程。

本文采用高速摄影技术,利用实验室自行搭建 的 SHPB-高速摄影机系统,记录 3D4D 和 3D5D 编 织复合材料的横向冲击变形过程,探究加载过程中 材料真实变形和损伤扩展,从而揭示三维编织复合 材料的失效机制。

1 试验部分

#### 1.1 试验材料

3D4D编织预成型体采用四步法  $1 \times 1$ 编织<sup>[13]</sup> 而成。3D5D编织预成型体是在 3D4D编织工艺基础 上沿编织方向加入不参与编织的轴纱制备而成<sup>[6]</sup>。 三维编织预成型体及内单元细观结构模型(CATIA V5软件建立)如图 1 所示。纱线选用 T700-12K 碳 纤维(日本东丽)。纱线排列用 $m(行) \times n(0)$ 来表示, 附加行列内的纱线根数为 m+n 根。编织纱排列为



(a) 三维编织预成型体



(b) 3D4D 内单元细观结构模型



(c) 3D5D 内单元细观结构模型

图 1 三维编织预成型体及 3D4D、3D5D 内单元细观 结构模型图

Fig 1 3D braided preform and interior unit microstructure model of 3D4D and 3D5D

19×3,边纱 19+3 根,轴纱作为不动纱沿编织方向 嵌入编织纱中间,轴纱与编织纱比例为 1:2,总用 纱数量计算如式(1)和(2)所示。

$$N_{\rm 3D4D} = m \times n + (m+n) \tag{1}$$

$$N_{3D5D} = \frac{3}{2}m \times n + (m+n)$$
 (2)

式中: $N_{3D4D}$ 为 3D4D编织预成型体总用纱数; $N_{3D5D}$ 为 3D5D编织预成型体总用纱数。

采用真空辅助树脂传递模塑法(VARTM)制备 三维编织复合材料。基体选用 JA-02 型环氧树脂 (中国常熟佳发),固化工艺为先于 90 ℃下固化 2 h, 再于 110 ℃下固化1 h,最后于 130 ℃下固化 4 h。 三维编织复合材料制备工艺如图 2 所示,其规格参 数如表 1 所示。



(a) 预成型体制备



(b) **真空袋** 



(c) VARTM 固化



(d) 复合材料成型

图 2 三维编织复合材料制备 Fig. 2 Preparation of 3D braided composites 表 1 三维编织复合材料规格参数 Table 1 Parameters of 3D braided composites

编织 结构	编织 角/(°)	编织 纱数 量/根	轴纱 数量/ 根	宽度/ mm	<b>厚度</b> / mm	纤维体 积含量/ %	密度/ (g・ cm <sup>-3</sup> )	
3D4D	30	79	0	25.1	4.00	35.7	1.45	
3D5D	30	79	30	27.2	4.16	38.3	1.61	

#### 1.2 试验方法

本文采用 SHPB-高速摄影机系统对三维编织 复合材料进行横向冲击测试。SHPB 装置由气枪、 撞击杆、输入杆和信号采集处理装置组成。高速摄 影机系统由高速摄影机(中国上海西努光学科技)和 辅助照明装置组成,其中高速摄影机型号为 는 SPEED 716,最高拍摄速度为 500 000 帧/s。

通过一维线弹性应力波理论<sup>[14]</sup>计算得到横向 冲击试验的载荷 P(t)、位移  $\mu(t)$ 如式(3)~(5)所 示。横向冲击测试示意图如图 3 所示。

$$P(t) = EA[\varepsilon_{\rm I}(t) + \varepsilon_{\rm R}(t)]$$
(3)

$$\mu(t) = C_0 \int_0^t \left[ \varepsilon_{\mathrm{I}}(t) - \varepsilon_{\mathrm{R}}(t) \right] \mathrm{d}t \tag{4}$$

$$C_0 = \sqrt{E/\rho} \tag{5}$$

式中:  $\epsilon_1(t)$ 、 $\epsilon_R(t)$ 分别为入射波和反射波引起的应 变; E、A、 $\rho$ 分别为输入杆弹性模量、横截面积和密 度;  $C_0$ 为应力波在输入杆中的传播速度。

通过高速摄影记录每个时刻试件冲击变形,采 用 Image J 图像分析软件(National Institutes of Health 开发)对图片进行处理,利用阈值分割法<sup>[15]</sup> 对图片进行预处理,划定目标区域并选取目标点,



图 3 横向冲击测试示意图 Fig 3 Diagram of transverse impact test

计算各个时刻试件上该点冲击位移,表征试件冲击 变形,相对测量误差在3%左右。选用0.20、0.25、 0.30 MPa来探究不同气压下材料损伤机理,如图4 所示。应力波波宽反映冲击时间,只和撞击杆长度 有关;波幅反映输入杆的应力大小,只和撞击杆长度 有关<sup>[16]</sup>。由图4可知,3种冲击气压产生的应力波 幅值随着冲击气压的增加而增大,3个应力波从上 升沿到下降沿的时间基本不变。

通过高速摄影实时拍摄,得到材料失效时刻冲 击循环(相邻两次应力波的时间间隔)变形图像。 3D4D试件在冲击气压为 0.30 MPa 下第 9 个冲击 循环断裂失效变形图如图 5 所示。假定每一个冲击 循环内,杆子冲击试件初始时刻为 0 µs。本文所采用 的拍摄速度为 50 000 帧/s,每个冲击循环为 700 μs。







图 5 3D4D 试件第 9 个冲击循环高速摄影失效变形图 Fig 5 High speed failure deformation of 3D4D sample in the 9<sup>th</sup> impact cycle

### 2 结果与讨论

3 种冲击气压条件下 3D4D、3D5D 试件的载荷-位移和位移-时间曲线对比如图 6 所示。试件冲击 载荷峰值和位移都随着冲击气压增加而增大,而随 冲击循环次数的增加而减小。相同气压下,与 3D4D 试件相比,3D5D 试件的冲击载荷峰值较大,冲击变 形较小且位移差距随着冲击气压的增加而增大。

这里分别选取 3D4D、3D5D 试件在第 1 个冲击 循环内位移-时间曲线对试件失效前弹塑性变形进 行研究,结果如图 7 所示。由图 7 可知,两种试件曲 线均呈现一定的波动性,从曲线可以看出位移变化 有两个阶段,即上升(I)阶段、回弹(II)阶段。 I 阶 段为线性阶段,在此阶段内压缩应力波到达入射杆 端面,入射杆撞击试样,试样受力变形后位移增加, 在 160 μs 时刻(2 点处)达到最大位移。Ⅱ阶段为回 弹阶段,此时压缩应力波作用结束,入射杆不再运动,







应力波冲击能部分被试件吸收,转化为试件变形能。 由于冲击波作用,试件产生振动,导致位移-时间曲 线产生波动,此时位移反映了冲击后试件的真实变 形。与 3D4D 试件相比,3D5D 试件在 I 阶段冲击位 移较小,在Ⅱ阶段位移波动幅度也较小。由此表明, 轴纱的存在增加了 3D5D 编织复合材料弯曲模量, 提高了试件抗横向冲击变形的能力。

对图 7 曲线上 1、2 两点进行研究,3D4D、3D5D 试件的冲击变形最大位移如表 2 所示。与 3D4D 试 件相比,3 种气压下 3D5D 试件在第一个冲击循环最 大冲击位移较小,抵抗横向冲击变形能力较好。

表 2 3 种冲击气压下 3D4D、3D5D 试件的最大冲击位移 Table 2 Maximum impact displacement of 3D4D and 3D5D samples under three impact gas pressures

编织	最大冲击位移/mm					
结构	0 30 MPa	0 20 MPa	0 25 MPa			
3D4D	1. 8	2. 4	2.6			
3D5D	1. 7	2. 3	2.4			

两种试件在第 9 个冲击循环位移一时间曲线如 图 8 所示。在冲击气压 0. 30 MPa 下 3D4D 试件的 位移一时间曲线波动剧烈,冲击位移骤增,变形急剧 增加,最终试件发生断裂并整体失效。其余曲线波 动较小,冲击变形增加缓慢,试件未断裂。



图 8 3D4D、3D5D 试件第 9 个冲击循环 位移-时间曲线

Fig 8 The 9<sup>th</sup> impact cycle displacement-time curves of 3D4D and 3D5D samples

选取图 8 中冲击气压为 0. 30 MPa 条件下 1~6 时刻试件损伤变形图像进行研究,如图 9 所示。





(a) 3D4D







(b) 3D5D

图 9 3D4D、3D5D 试件在 0.30 MPa 条件下 高速摄影失效变形图

Fig 9 High speed failure deformation of 3D4D and 3D5D samples under 0, 30 MPa

由图 9(a)可知:在 1 时刻,3D4D 试件冲击侧面 形成沿编织角方向扩展的剪切带;2 时刻冲击背面 纤维束沿着剪切带方向开始断裂;3 时刻,断裂由冲 击背面向冲击面扩展;4 时刻,纤维束完全断裂,达 到最大冲击变形;5 时刻,试件回弹,变形回复。由 图 9(b)可知,与 3D4D 试件相比,3D5D 试件纱线屈 曲变形并伴有树脂脆裂及脱落,冲击侧面产生剪切 带,损伤扩展不明显。在本试验条件下,3D5D 试件 的纤维未断裂,结构保持完整。图 10 为编织纱和轴 纱应力状态示意图。3D5D 编织复合材料中轴纱不 参与编织,垂直于施加载荷 F,且其编织纱受到的载 荷  $F\cos\alpha$ 小于轴纱。在冲击变形时,轴纱先承力, 其应力迅速增强,纱线产生屈曲变形并沿轴向传播 给编织纱,有效抵抗冲击变形。

3 种冲击气压条件下 3D4D、3D5D 试件横向冲击 最终破坏形态如图 11 所示。由图 11 可知,3D4D、 3D5D 试件损伤程度都随着冲击气压增大而增大, 且损伤区域都集中在冲击区。在相同气压下两种试 件的破坏模式有显著差异。当冲击气压为 0.20 MPa 时,3D4D 试件主要破坏模式为树脂沿编织方向开





Fig 10 The schematic diagram of stress state of the axial yarns and braiding yarns



0.20 MPa



0.25 MPa



0.30 MPa (a) 3D4D 试件



0.20 MPa



0.25 MPa



0.30 MPa

(b) 3D5D **试件** 

- 图 11 3 种冲击气压条件下 3D4D、3D5D 试件 最终破坏形态图
- Fig 11 Final damage morphology of 3D4D and 3D5D samples under three gas pressures

裂,冲击面边缘部分基体脱落;3D5D 试件树脂脆裂,冲击损伤面积较小。当冲击气压为0.25 MPa 时,3D4D 试件树脂和纤维束脱黏,裂纹向冲击周围 区域扩展;3D5D 试件冲击损伤区域增大,裂纹横向 扩展不明显。当冲击气压为0.30 MPa 时,3D4D 试 件纤维束断裂并产生抽拔,部分纤维束表现出剪切 破坏特征,断裂口基本平整,呈现一定脆性特征; 3D5D 试件冲击区树脂脱落,裂纹沿横向扩展。 3D4D 试件主要失效模式包括基体脆裂、界面脱黏 及开裂、纤维束断裂,而 3D5D 试件主要破坏模式是 表面大量树脂脆裂及脱落。由此表明,轴纱增大了 3D5D 试件的弯曲模量,使该三维编织复合材料抗 横向冲击变形能力提高。

## 3 结 论

(1)在本文试验条件下,三维编织复合材料横向冲击载荷峰值随着冲击气压增加而增大,而随冲击循环的增加而减小。与 3D4D 试件相比,3D5D 试件冲击载荷峰值较大,冲击变形较小。

(2)冲击循环位移-时间曲线存在上升和回弹两 个阶段。与 3D4D 试件相比,3D5D 试件最大冲击位 移较小。冲击气压为 0. 30 MPa 时,3D4D 试件在第 9 个冲击循环发生断裂,断裂失效时刻试件曲线波 动剧烈,位移骤增,变形急剧增加。3D5D 试件的冲 击循环位移-时间曲线平缓,位移增加缓慢,未发生 断裂失效,结构保持完整。

(3) 3D4D 编织复合材料主要破坏模式包括:基体脆裂、树脂与纤维脱黏、界面开裂、纤维束横向剪切断裂及抽拔。3D5D 编织复合材料在冲击变形时轴纱先承力,使纱线屈曲变形,应力沿轴向传播,结构保持完整,破坏模式主要是基体脆裂及脱落。因此,轴纱提高了 3D5D 编织复合材料弯曲模量,对抵抗横向冲击变形影响显著。

#### 参考文献

- [1] MOURITZ A P, BANNISTER M K, FALZON P J, et al. Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1999, 30(12): 1445-1461.
- [2] MAJIDI A P, YANG J M, CHOU T W. Mechanical behavior of three dimensional braided metal-matrix composites. [C]// Testing, Technology of Metal - Matrix Composites. Philadelphia:ASTM,1988: 31-36.
- [3] SUN B Z, HU D M, GU B H. Transverse impact damage and energy absorption of 3-D multi-structured knitted composite
   [J]. Composites Part B: Engineering, 2009, 40(6): 572-583.
- [4] ZHANG Y, WANG P, GUO C B. Energy absorption behaviors of 3D braided composites under impact loadings with frequency domain analysis[J]. Polymer Composites, 2016, 37 (5): 1620-1627.
- [5] 卢子兴,刘振国,寇长河,等. 三维编织复合材料的弯曲实验及 其失效分析[C]//复合材料:生命、环境与高技术——第十二届

**全国复合材料学术会议论文集. 天津:天津大学出版社**,2002: 1085-1088.

- [6] LIU Y, CHEN Z F, ZHU J X, et al. Comparison of 3D fourdirectional and five-directional braided SiO<sub>2f</sub>/SiO<sub>2</sub> composites with respect to mechanical properties and fracture behavior[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 558, 170-174.
- [7] LI D S, FANG D N, JIANG Nan, et al. Finite element modeling of mechanical properties of 3D five-directional rectangular braided composites [J]. Composites Part B: Engineering, 2011, 42(6): 1373-1385.
- [8] LI D S, LU Z X, CHEN L, et al. Microstructure and mechanical properties of three-dimensional five-directional braided composites [J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 46(18/19): 3422-3432.
- [9] LI D S, LU Z X, JIANG N, et al. High strain rate behavior and failure mechanism of three-dimensional five-directional carbon/phenolic braided composites under transverse compression[J]. Composites Part B: Engineering, 2011, 42 (2): 309-317.
- [10] ZHOU H L, PAN Z X, GIDEON, ROTICH K, et al. Experimental and numerical investigation of the transverse impact damage and deformation of 3-D circular braided composite tubes from meso-structure approach[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 86: 243-253.
- [11] ZHOU H L, SUN B Z, GU B H. Responses of 3D fourdirectional and five-directional circular braided composite tubes under transverse impact [J]. International Journal of Crashworthiness, 2016, 21(4): 353-366.
- [12] ZHOU H L, ZHANG W, LIU T, et al. Finite element analyses on transverse impact behaviors of 3-D circular braided composite tubes with different braiding angles[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 79: 52-62.
- [13] 陈利,李嘉禄,李学明,等. 三维方型编织预制件的纱线编织结构[J]. 复合材料学报, 2000, 17(3): 1-5.
- [14] MEYERS M A. Dynamic behavior of materials [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1994: 23-61.
- [15] 孙水发,董方敏. Image J 图像处理与实践[M].北京:国防工业 出版社,2013: 70-102.
- [16] 孙宝忠. 三维纺织结构复合材料压缩性能的应变率效应及动态 特性分析[D]. 上海:东华大学纺织学院,2010: 12-17.

(责任编辑:徐惠华)