

# 有限元分析法研究 Kevlar129 纱线及织物的拉伸性能

程建芳<sup>1</sup>, 肖 露<sup>1</sup>, 柴晓明<sup>1</sup>, 周纪明<sup>2</sup>, 陈建勇<sup>1</sup>, 张华鹏<sup>1\*</sup>

(1. 浙江理工大学先进纺织材料与制备技术教育部重点实验室, 杭州 310018; 2. 东华大学纺织学院, 上海 210620)

**摘 要:** 在对 Kevlar129 纱线拉伸力学性能测试和建立反映纱线屈曲的纱线有限元模型的基础上,在纱线结构层次上建立织物的有限元分析模型,采用带有主应力断裂失效准则的弹性正交各向异性材料模型,对比分析了织物的拉伸力学性质,得到了预测织物拉伸力学性质的有限元分析方法,并对纱线和织物拉伸断裂过程进行了分析。Kevlar 织物拉伸性能的有限元分析和实验结果相比,初始拉伸阶段应力较低,拉伸断裂前应力稍高,总体吻合程度较好,对断裂点附近的力学性能预测仍有待于进一步提高。

**关键词:** Kevlar129; 拉伸性能; 有限元分析; 正交各向异性

**中图分类号:** O316

**文献标志码:** A

## 0 引 言

Kevlar 是美国杜邦(DuPont)公司为对位芳族聚酰胺有机合成纤维注册的商品名<sup>[1]</sup>,其成纤聚合物为聚对苯二甲酰对苯二胺。Kevlar 纤维具有很多优良的机械性能,比如高模量、高强度、耐高温、耐化学腐蚀等等,因此受到人们的重视<sup>[2]</sup>。由于 Kevlar 产品材料坚韧耐磨、刚柔相济,作为高性能材料在国防和军事领域应用广泛。

织物的力学性能与防弹性能有很大的关联性,力学性能的研究对于防弹复合材料的设计有指导性的意义。计算机模拟是材料领域性能研究与应用的一个新方向,有限元法是常用的方法之一。将有限元分析与实验相结合,对防弹织物和复合材料的分析与应用将会起到积极的推动作用。虽然对于织物力学性能的研究有很多,比如陈晓<sup>[3]</sup>,M M Shokrieh 和 G H Javadpour<sup>[4]</sup>、C Y Tham<sup>[5]</sup> 等人,均是在宏观结构上进行的研究分析,在纱线结构层次上进行细观研究的还很有限。仍无法解释纱线之间的交互作用,比如纱线的结构、性能及纱线之间的摩擦力等因素的影响。虽然 Y Duan<sup>[6]</sup>、A Shahkarami<sup>[7]</sup>、

Cuong Ha-Minh<sup>[8]</sup>等也在纱线的结构层次上对织物建立了有限元模型,但是他们在纱线的厚度方向上都是划分两个单元,计算单元量很大,计算时间和效率较低。

笔者采用 solidworks<sup>[9]</sup> 三维制图软件建立 Kevlar129 纱线及织物的几何模型,然后导入 ANSYS<sup>[10-11]</sup> 有限元分析软件,在纱线的厚度方向划分一个单元,纱线边缘的截面用平面代替弧面,有效地防止了退化三角形单元的产生。由于纱线本身力学性质的各向异性,纱线的材料模型选择线弹性正交各向异性材料模型,为避免纱线在有限元分析过程中因大变形而出现单元畸变,引入纱线最大主应力失效模型。运用 LS-DYNA 动态显式求解器数值模拟分析 Kevlar129 纱线及织物的拉伸性能并与实验结果进行对比,为通过纱线力学性质预测织物力学性能奠定基础。

## 1 实验部分

### 1.1 Kevlar129 纱线拉伸性能测试

从织物中取出带有屈曲的单根纱线(纤维束),线密度 1 100 dtex,参照 GB/T 3362—2005 的标准

收稿日期: 2012-10-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51073141)

作者简介: 程建芳(1986—),女,河南商丘人,硕士研究生,主要从事现代纺织技术及新产品的研究。

\* 通信作者: 张华鹏,电子邮箱: zhp@zstu.edu.cn

测试拉伸性能,按图1尺寸截取纱线(纤维束),有效夹持距为150 mm。为了防止纱线在夹头内打滑或断裂,在试样的端部用双面胶粘结了长宽为50 mm×20 mm的加强纸片。拉伸仪器使用 INSTRON2365,拉伸速度为100 mm/min,重复测试6次取其平均值。

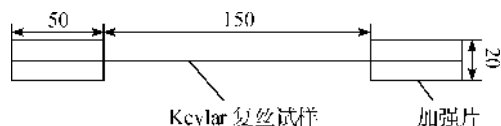


图1 纱线拉伸试样示意图(单位 mm)

## 1.2 Kevlar129 织物拉伸性能测试

Kevlar129 平纹织物规格如表1所示,在 INSTRON3367 试验机上沿着经向进行拉伸性能测试。测试试样如图2所示,试样宽度25 mm,长度为200 mm,加持长度为100 mm,在拉伸性能测试中为了防止夹头夹断纤维,保障试样断裂尽可能发生在中部,在试样的端部粘结了加强片,加强片选用非织造布制作,胶接加强片所用的胶粘剂为环氧树脂。拉伸速度为100 mm/min,重复测试3次取其平均值。

表1 Kevlar129 平纹织物规格

织物种类	面密度 (g/m <sup>2</sup> )	厚度 (mm)	经密/ (根/10 mm)	纬密/ (根/10 mm)	经纬纱 宽/mm
Kevlar129	201	0.31	88	89	0.996

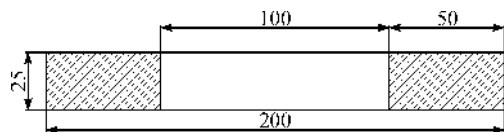


图2 织物拉伸试样示意图(单位 mm)

## 2 有限元模拟

图3为Kevlar129平纹织物横截面的显微镜图像与有限元模型对比图,经显微镜测量,经纬纱线厚度0.310 mm,纱线宽度0.996 mm,纱线的横截面为0.120 143 9 mm<sup>2</sup>,相邻经纬纱线中心距离1.148 mm。

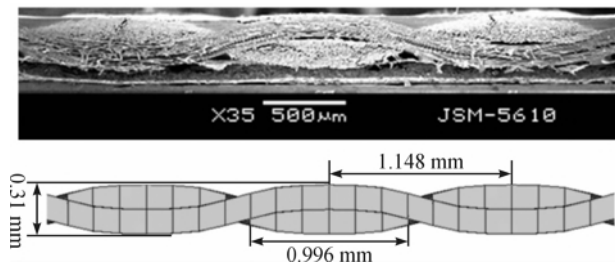


图3 Kevlar129 平纹织物横截面的显微镜图像与有限元模型对比图

用 solidworks 专业绘图软件建立织物中带屈曲的 Kevlar129 纱线的 3D 几何模型,导入 ANSYS 有限元软件进行前处理,划分网格得到有限元模型如图4所示。纱线的单元类型选择 solid164 单点积分单元,该单元类型可以适应大变形模拟的需要,没有全积分和缩减积分单元容易出现体积锁定和剪切锁定问题。网格划分全部都是八节点六面体单元,纱线的宽度方向上有6个单元,厚度方向上只有一个单元,通过增强拟应变沙漏控制<sup>[12-13]</sup>,可以保证较低的沙漏能。

图5为Kevlar129 织物拉伸有限元模型,由于拉伸模型关于  $y-z$  平面对称,图5中为二分之一的有限元模型,模型中织物宽度为11根纱线即12.628 mm;长度方向为88根纱线即101.024 mm。纱线之间定义单面接触,拉伸端  $x$ 、 $y$  方向进行约束, $z$  方向自由,另一端为全约束,沿对称面施加对称约束条件。

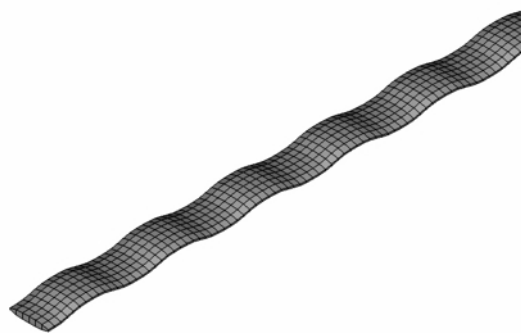


图4 Kevlar129 纱线的有限元模型

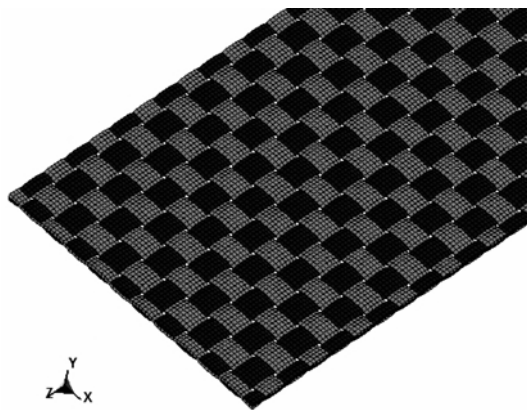


图5 Kevlar129 织物拉伸有限元模型(1/2 模型)

## 3 结果与讨论

### 3.1 kevlar129 纱线拉伸性能研究

INSTRON2365 测试得到的 Kevlar129 纱线的载荷伸长曲线,经过转换得到应力—应变曲线如图

6 所示。轴向拉伸模量  $E_{11}$  从图 6 中测得,而横向模量  $E_{22}$  和  $E_{33}$ 、剪切模量  $G_{12}$ 、 $G_{31}$  来自文献[6]。由于纱线中纤维可以自由滑动,三个泊松比均取值为 0。断裂主应力为 2.05 GPa,纱线轴向对应断裂应力  $\sigma_{11}$  为 1.8 GPa,具体的纱线力学性能参数如表 2 所示。

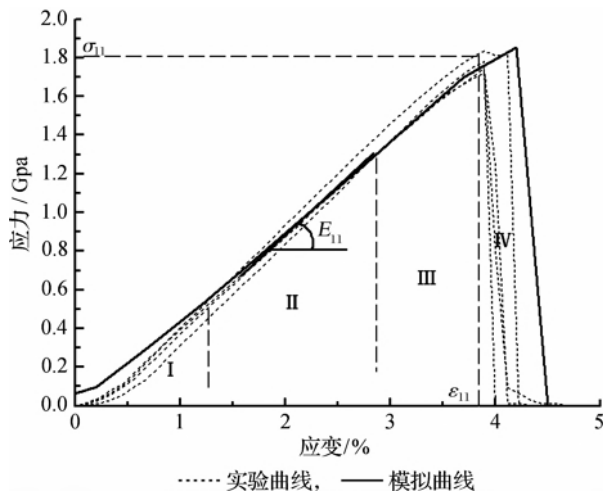


图 6 Kevlar129 纱线拉伸性能有限元模拟与实验相对比

表 2 Kevlar129 纱线正交各向异性

弹性材料数据										GPa
$E_{11}$	$E_{22}$	$E_{33}$	$G_{12}$	$G_{31}$	$G_{23}$	$V_{21}$	$V_{31}$	$V_{32}$	$\sigma_{11}$	
60	3.28	3.28	3.28	3.28	1.64	0	0	0	1.8	

从图 6 中可以看出纱线拉伸曲线可以分为 4 个部分,第 I 部分为纱线的屈曲伸直过程。在卷曲区域,由应力—应变图可以看出应力的微小增加导致应变较大的增加,在织物织造时导致单根纱线有一个内部的卷曲,这部分的载荷通过移除卷曲使纱线变直。随着应力的增加,第 II 部分弹性区域开始出现,伸直的纱线开始承受更多的应力,应力—应变曲线开始出现一个斜坡,纱线的杨氏模量  $E_{11}$  就是从弹性区域的斜率计算出来的。在到达断裂强度顶点之前应力—应变曲线是非线性的(即第 III 部分非线性区域),由纱线中单根纤维的随机断裂形成。最后一个阶段就是超过最大断裂强度之后,随着应变的增加,应力迅速下降。纱线的断裂应力  $\sigma_{11}$  和断裂应变  $\epsilon_{11}$ ,可以从第 III 部分与第 IV 部分获得。

实验和有限元模拟中的纱线均是从织物中取出的带有屈曲的纱线,在拉伸测试时,加载预张力使纱线伸直,而有限元模拟中纱线保持屈曲状态,所以图 6 所示模拟应力应变曲线在对应实验应力应变曲线应变为 0 时已经有一定的应力。图 7 为模拟的纱线应变为 1.5% 时的纱线应力分布,此时对应织物中

Kevlar129 纱线在织物中的屈曲被拉直的状态。在实际实验中,纱线的屈曲由于从织物中拆出和预张力大部分已被消除,所以第 I 部分所占的比例也较小。图 8 显示了模拟的纱线被拉断前一刻的纱线应力分布,由于屈曲伸直,纱线边缘的应力稍高于中部。

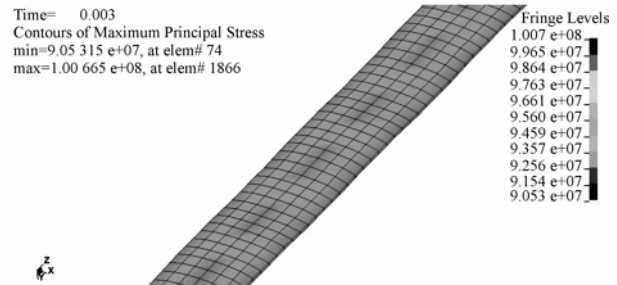


图 7 纱线应变为 1.5% 时有限元模型图

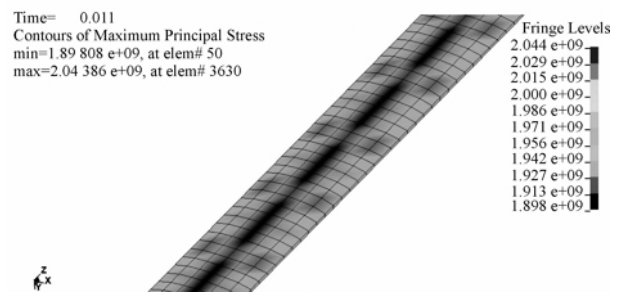


图 8 纱线应变为 5.5% 时有限元模型图

### 3.2 Kevlar129 织物拉伸性能研究

图 9 为织物拉伸曲线图,织物实际拉伸过程分为 4 个部分:第 I 部分是织物中拉伸方向纱线的屈曲伸直过程;第 II 部分是织物的弹性变形区域,伸直的纱线开始承受更多的应力;第 III 部分涉及到纤维和纱线断裂的不同步性,导致拉伸曲线斜率与第 II 部分相比变小;第 IV 部分,大部分纱线断裂,部分纱线滑移,织物产生断裂。

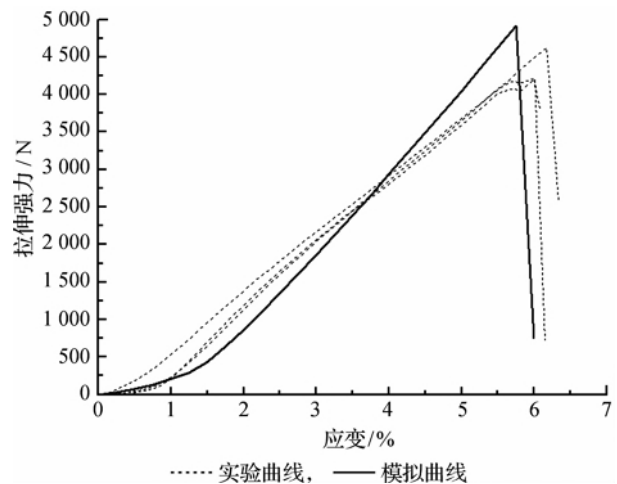


图 9 Kevlar129 织物拉伸性能有限元模拟与实验对比

单根纱线的强力为 235 N, 25 mm 宽度内有 22

根纱线,在与纬纱交织之前经纱的拉伸强力理论上应该为  $235 \text{ N} \times 22 = 5170 \text{ N}$ ,经纬纱交织之后的经纱拉伸强力为  $4621 \text{ N}$ ,纱线的强力利用系数为  $4621/5170 \times 100\% = 89\%$ 。由于芳纶纤维表面是光滑的,摩擦力很小,当织物沿着经向拉伸时,纬纱几乎没有提供作用,经纱要承担纬纱额外的载荷<sup>[14]</sup>,致使经纱的力学性能不是完全相同的,断裂强度最低的纱线开始断裂,然后逐根断裂;另一方面,织物松散的结构减少了纱线的弯曲,导致经纱与纬纱之间的压力减小。

进一步对比实验拉伸曲线与模拟拉伸曲线图可以看出,织物拉伸的前两个阶段,同样拉伸变形下的实验值稍大于模拟值,主要是由于在实际拉伸实验中,织物拉伸时具有一定的预加张力,纱线屈曲一定程度被拉直,在同样拉伸变形下,实验曲线比模拟曲线有较高的拉伸载荷。随着拉伸的进行,在同样拉伸变形下,实验载荷值开始小于模拟值,这主要是因为有限元模拟时,假定纱线为弹性材料,没有考虑纱线中纤维的断裂随机性。模拟曲线最后一个阶段没有小的载荷波动而呈现近乎脆性断裂,是由于模拟时织物中的每根纱线都是一个整体,而实际中纱线是由纤维组成的,拉伸过程中会有断裂不同时出现。

图10和图11为有限元模拟织物拉伸图,从图10可以看出,边界的纱线首先被拉紧,过早地承担外部载荷,致使外面的纱线首先断裂,然后破坏向内部延伸。从图11可以看出,经纱受到的力远远大于纬纱,沿着经纱方向拉伸,经纱受到大部分的拉力,而纬纱只是承担经纬纱之间的摩擦力给予的些许应力,这个应力与经纬纱之间的摩擦系数有关,而Kevlar129织物的经纬纱摩擦系数很小,所以给予纬纱的应力也很小。从图11中还可以看到,在经纬纱交界处存在应力集中现象,这主要是因为当经纱受到拉伸时,经纱的屈曲会被拉直,带动纬纱向内收缩,纬纱在交界处给经纱一个反作用力,致使经纬纱交界处应力较大。

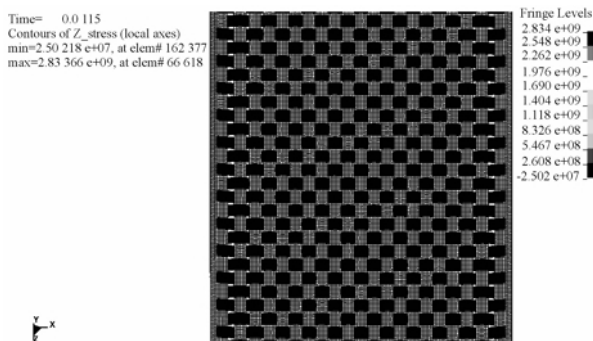


图10 有限元模拟织物拉伸图

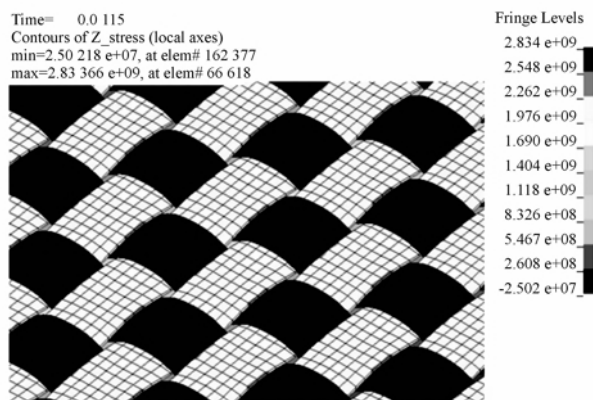


图11 有限元模拟织物拉伸图

## 4 结 论

a) 采用主应力失效准则的弹性正交各向异性材料模型,建立反映纱线屈曲结构的纱线和织物有限元模型,在简单纱线性能测试基础上,可以较好地预测织物的拉伸力学性能;

b) 所建立的纱线和织物有限元模型可以较好地反映纱线和织物拉伸过程中几何结构的变化和变形机理;

c) 织物拉伸有限元分析和实验结果对比,前者的拉伸应力在拉伸初始阶段较低,拉伸断裂前应力较高。为了更好地模拟和分析纱线和织物的拉伸断裂现象,反映纱线中纤维和织物中纱线的断裂不同时性,需要进一步建立反映纱线渐进损伤的正交各向异性材料模型,以更准确地得到织物拉伸断裂点附近的力学性质。

## 参考文献:

- [1] Yang H H. Kevlar Aramid Fiber[M]. New York: John Wiley & Sons Ltd, 1993: 312-313.
- [2] 郑震, 杨年慈, 施楣梧, 等. 硬质防弹纤维复合材料的研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2005, 23(6): 905-910.
- [3] 陈晓, 周宏, 王西亭. 叠层靶板的弹道侵彻数值仿真[J]. 兵工学报, 2004, 25(3): 340-343.
- [4] Shokrieh M M, Javadpour G H. Penetration analysis of a projectile in ceramic composite armor [J]. Composite Structures, 2008, 82(5): 269-276.
- [5] Tham C Y, Tan V B C, Lee H P. Ballistic impact of a kevlar helmet: experiment and simulations [J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(8): 304-318.
- [6] Duan Y, Keefe M, Bogetti T A, et al. A numerical investigation of the influence of friction on energy absorp-

- tion by a high-strength fabric subjected to ballistic impact [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 32(8): 1299-1312.
- [7] Shahkarami A, Vaziri R. A continuum shell finite element model for impact simulation of woven fabrics[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(1): 104 - 119.
- [8] Ha-Minh C, Kanit T, Boussu F, et al. Numerical multi-scale modeling for textile woven fabric against ballistic impact[J]. *Computational Materials Science*, 2011, 50(7): 2172 - 2184.
- [9] 詹迪维. solidworks 机械设计教程 2012[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 1-285.
- [10] 尚晓江, 苏建宇, 王化锋, 等. ANSYS-LS-DYNA 动力学分析方法与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 1-322.
- [11] 张红松, 胡仁喜, 康士廷, 等. ANSYS 13.0 有限元分析从入门到精通[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 1-461.
- [12] Livermore Software Technology Corporation. Ls-dyna Keyword User's Manual[M]. Livermore, 2012: 1268.
- [13] Puso M A. A highly efficient enhanced assumed strain physically stabilized hexahedral element[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2000, 49(8): 1029-1064.
- [14] Huang G. Tensile behaviours of woven fabrics and laminates[J]. *Materials and Design*, 2007, 28(2): 704-707.

## Study on Tensile Property of Kevlar129 Yarn and Fabric with Finite Element Analysis Method

CHENG Jian-fang<sup>1</sup>, XIAO Lu<sup>1</sup>, CHAI Xiao-ming<sup>1</sup>, ZHOU Ji-ming<sup>2</sup>, CHEN Jian-yong<sup>1</sup>, ZHANG Hua-peng<sup>1</sup>

- (1. Key Laboratory of Advanced Textile Materials and Manufacturing Technology, Ministry of Education, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;  
2. College of Textiles, Donghua University, Shanghai 210620, China)

**Abstract:** This research establishes finite element analysis model of fabric at the level of yarn structure on the basis of tensile mechanical property test of Kevlar129 yarn and the establishment of finite element yarn model reflecting yarn flexion; uses elastic orthotropic material models with principal stress fracture failure criterion; makes a contrastive analysis on tensile mechanical property of fabric and obtains the finite element analysis method for predicting the tensile mechanical property of fabric; analyzes the tensile failure process of yarn and fabric. In the comparison between the finite element analysis of tensile property of Kevlar fabric and experimental result, the stress is low in the initial tensile stage and the stress is higher before tensile failure; the overall matching degree is good and the prediction on mechanical property near the breaking point is to be further improved.

**Key words:** Kevlar129; tensile property; finite element analysis; orthotropy

(责任编辑: 马春晓)