

# 真丝和涤纶仿真丝织物的拉伸性能有限元仿真

李瑛慧<sup>1</sup>, 谢春萍<sup>1</sup>, 刘新金<sup>1,2</sup>, 苏旭中<sup>1</sup>

(1. 江南大学生态纺织教育部重点实验室, 江苏 无锡 214122; 2. 江苏苏丝丝绸股份有限公司, 江苏 宿迁 223700)

**摘要:** 为了在织物设计时可以依据织造原料的纱线性能来估算织物的拉伸性能, 以预测、优化织物的拉伸性能, 对织物的整个拉伸过程做了有限元仿真和试验验证。选用规格相近的涤纶仿真丝和真丝织物, 借助超景深数码显微镜 VHX-5000 测量织物试样, 获得纱线的几何结构参数, 运用 AutoCAD 软件构建织物三维系统的有限元模型; 并运用有限元软件 Ansys, 设置载荷和边界条件, 求解拉伸载荷的仿真数值结果; 最后将有限元模拟结果与试验结果相对比。结果表明: 织物拉伸模拟曲线与实验曲线基本相同, 证明有限元仿真的可行性; 涤纶仿真丝和真丝织物的拉伸曲线在拉伸初始阶段和断裂阶段有明显差异。

**关键词:** 拉伸力学性能; 真丝织物; 涤纶仿真丝织物; 有限元仿真; 试验验证

中图分类号: TS101.923

文献标志码: A

文章编号: 1001-7003(2018)03-0027-05

引用页码: 031105

## Finite element simulation of tensile mechanical properties of silk fabrics and polyester silk-like fabrics

LI Yinghui<sup>1</sup>, XIE Chunping<sup>1</sup>, LIU Xinjin<sup>1,2</sup>, SU Xuzhong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Eco-Textiles, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. Jiangsu Spccc-silk Co., Ltd., Suqian 223700, China)

**Abstract:** In order to evaluate and optimize tensile mechanical properties of fabrics according to yarn properties of weaving materials in fabric design, finite element simulation and experimental verification of the whole tensile process were made for the fabric. Polyester silk-like and silk fabrics with similar specifications were chosen, and the fabric samples were measured with super depth of field digital microscope VHX-5000 to gain the geometry parameters of the yarns. The three-dimensional finite element model was built by AutoCAD. Then, the load and the boundary conditions were set by applying the finite element software Ansys to solve simulation results of tensile load. Lastly, the finite element simulation results and experimental results were compared. The results indicate that the tensile simulation curves and experimental curves are basically similar, verifying the feasibility of finite element simulation. There are obvious differences between silk fabrics and polyester silk-like fabrics in the initial stage and breaking stage of tensile curves.

**Key words:** tensile mechanical properties; silk fabrics; polyester silk-like fabrics; finite element simulation; experimental verification

收稿日期: 2017-07-04; 修回日期: 2017-12-25

**基金项目:** 江苏省博士后科研资助计划项目(1501146B); 中国博士后科学基金项目(2015M581722); 江苏省自然科学基金项目(BK20151359); 江苏省产学研项目(BY2015019-40, BY2016022-27); 江苏省科技成果转化项目(BA2014080); 纺织服装产业河南省协同创新项目(hnfx14002); 广东省产学研项目(2013B090600038); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏政办发(2014)37号); 新疆自治区重点研发项目(2016B02025-4); 江苏省先进纺织工程技术中心基金项目(XJFZ/2016/4)

**作者简介:** 李瑛慧(1993-), 女, 硕士研究生, 研究方向为有限元在织物上的应用。通信作者: 谢春萍, 教授, wxschp@vip.163.com。

真丝被誉为“纤维皇后”，其制成的织物手感清爽，格调高雅，轻盈飘逸，吸湿悬垂<sup>[1]</sup>，历来受到人们的喜爱。随着国内外市场对真丝织物的需求越来越大，加之天然条件有限，蚕丝产量难以满足日益突出的消费要求，从而使仿真丝织物得到迅速发展和重视。涤纶仿真丝织物是目前市面上流行最广泛的人造丝织物。涤纶作为国内产量最大的化学纤维，其物理机械性能与真丝较相近<sup>[2]</sup>，本文将对真丝和涤纶仿真丝织物进行对比分析，揭示其拉伸力学性能的差异。

织物的力学性能是评价其质量的一个重要指标。拉伸试验被广泛应用于织物力学性能的研究，很多学者已经对织物的拉伸力学性能做了大量的研究。李焰<sup>[3]</sup>从不同方向测试了机织物的力学性能，比较了同一织物试样不同方向的拉伸和弯曲性能。肖继海等<sup>[4]</sup>运用 BP 神经网络技术预测织物拉伸、悬垂、热传递等性能。Pierre 等<sup>[5]</sup>利用 X 线断层摄影术获得结构图像，并运用有限元从纤维层面模拟织物

破坏的机械行为，研究织物的力学性能。Tomislav 等<sup>[6]</sup>使用人工神经网络 ANN 方法建立织物拉伸性能的人工神经网络预测系统，用于预测织物的拉伸性能。施晨阳等<sup>[7]</sup>运用高速摄像机拍摄涤纶塔夫织物拉伸的全过程，分析拉伸直至断裂过程中的数字化信息。本文利用有限元软件 Ansys 对丝织物的拉伸性能进行仿真，通过纱线的拉伸性能对织物的拉伸力学性能进行预测，使设计时能有效地控制和优化织物拉伸性能。

## 1 织物微观模型建立

### 1.1 织物试样

选用目前市面上销售的规格相近的真丝织物（杭州丝绣丽语服饰有限公司）和涤纶仿真丝织物（苏州美耀纺织有限公司），按照实际织物拉伸试验样品尺寸（100 mm × 25 mm），建立这两种织物理模型，对织物拉伸力学性能进行有限元分析。表 1 为两种织物的规格和结构参数。

表 1 织物规格

Tab. 1 Fabrics specifications

织物样品	原料细度/dtex		密度/(根·10 cm <sup>-1</sup> )		平方米质量/(g·m <sup>-2</sup> )	厚度/mm	组织
	经	纬	经	纬			
真丝	22.2/24.4 × 2	22.2/24.4 × 2	220	220	68	0.181	平纹
涤纶仿真丝	44.44	44.44	210	210	61	0.175	平纹

### 1.2 织物微观模型构建

测量纱线和织物的几何结构数据，建立基于织物组织的真实微观模型。先用环氧树脂处理织物，使织物固化，便于观察织物的截面。利用 VHX-5000 超景深数码显微镜观察并测量织物的横截面，由于纱线横截面不是标准的圆或者椭圆，将纱线截面近似为椭圆，从而确保纱线与纱线足够接触，并且防止纱线模型接触过盈<sup>[8]</sup>。由于两种织物规格相近，采用统一的织物结构模型，在误差范围内，便于比较分析，织物经向截面的几何结构如图 1 所示。织物微观模型在 AutoCAD 软件中建立，坐标原点及坐标轴方向标注在图示位置，如图 2 所示。织物的微观模型的几何结构参数如表 2 所示。

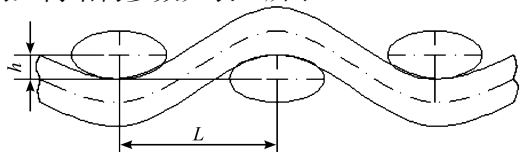


图 1 织物经向截面几何示意

Fig. 1 Geometry diagram of warp section of fabric

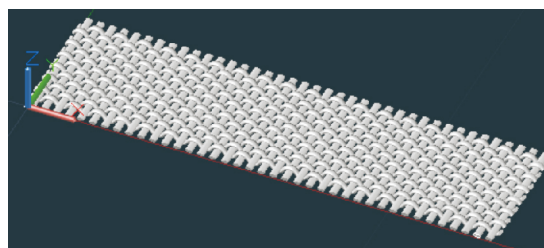


图 2 织物模型

Fig. 2 Fabric model

表 2 织物微观模型几何结构参数

Tab. 2 Geometrical parameters of meso-level fabrics

mm				
纱线种类	截面长轴	截面短轴	屈曲波高	纱线间距
纬纱	0.18	0.09	0.01	0.38
经纱	0.18	0.09	0.04	0.38

## 2 织物拉伸力学性能有限元分析

### 2.1 纱线拉伸试验

为得到纱线拉伸力学的各项参数，将纱线从织物中取出，进行拉伸试验<sup>[9]</sup>。在 Ansys 有限元软件中

设置纱线拉伸试验的相关数据,并运行模拟计算。试样 1 和 2,从织物的不同部分随机抽出经纱和纬纱各 50 根,参照 GB/T 3362—2005《碳纤维复丝拉伸性能试验方法》测试纱线拉伸性能,制成长度是 150 mm 的纱线试样。拉伸仪器使用 YG020 型等速伸长型强力仪,拉伸速度设置为 100 mm/min,分别进行两种纱线的拉伸试验。每种纱线测 10 次,最终的实验结果取平均值,如表 3 所示。

表 3 纱线拉伸性能参数  
Tab. 3 Tensile property parameters of yarns

纱线类别	$\rho /$ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	$E_1 /$ MPa	$E_2 (E_3) /$ MPa	$G /$ MPa	$\nu$
真丝	0.75	2.66	2.5	1.3	0
涤纶仿真丝	0.90	2.82	2.6	1.4	0

注: $\rho$ 为纱线材料的体积密度, $E_1$ 为纱线的轴向弹性模量, $E_2(E_3)$ 为与轴向互相垂直的其他两个方向的弹性模量, $G$ 为剪切模量, $\nu$ 为泊松比。

### 2.2 定义材料模型

先确定各向同性线弹性材料,输入对应的弹性模量和泊松比,再定义非弹性各向同性材料模型,输入相应的弹性极限和与等向强化材料有关的材料参数。材料服从非线性等向强化规律,这种材料模型特别适合大变形位移分析。

### 2.3 单元选择和网格划分

纱线选用 Solid186 三维固体结构单元,该单元拥有二次位移模式,可以对不规整的网格进行计算,能够更好地兼容 CAD/CAM 系统建立的物理模型。并且该单元有 20 个节点,每个节点有 X、Y、Z 三个方

向的自由度,具有任意空间的各向异性。选用接触单元 CONTA174 和目标单元 TARGE170 对经纱和纬纱相互接触部分进行定义。由于组成织物的纱线十分规整,所以选用六面体单元,采用体扫略的方式划分网格。划分网格后的织物模型如图 3 所示。

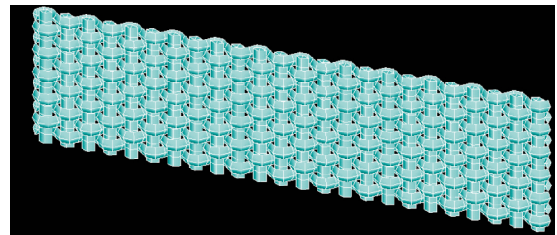


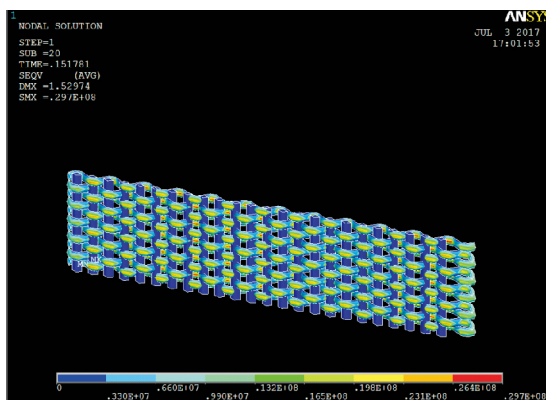
图 3 划分网格的织物模型  
Fig. 3 Mesh model of fabric

### 2.4 定义边界条件和载荷

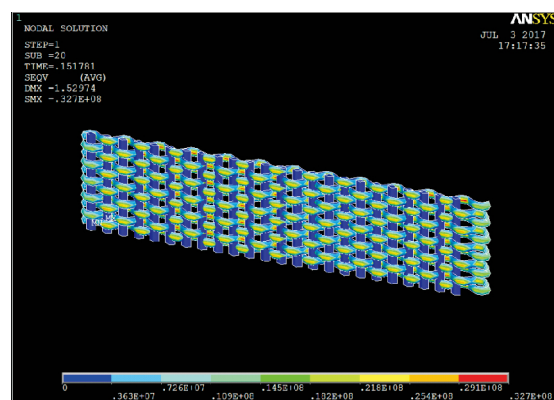
如图 3 所示,划分网格后的织物模型左端面(即所有经纱左边横截面)所有节点,施加全约束。选择模型上端面(即所有纬纱上边横截面)和下端面(即所有纬纱下边横截面)施加 Y 方向和 Z 方向的约束。模型右端面(即所有经纱右边横截面)施加 Y 方向和 Z 方向的约束,X 方向施加速度载荷为 100 mm/min。

### 2.5 设置分析选项并求解

激活静力学分析,设置大变形选项,载荷加载方式选用斜坡加载,采用大变形选项和斜坡加载载荷方式是为了防止纱线拉伸过程产生大变形导致结果不收敛,再定义载荷步和载荷子步,并进行有限元求解。对计算结果进行后处理,得到织物拉伸应力云图,图 4(a)(b)分别是真丝和涤纶仿真丝织物载荷步为 20 时的拉伸应力云图。



(a) 真丝



(b) 涤纶仿真丝

图 4 织物拉伸应力云图

Fig. 4 Stress nephogram of fabrics under warp tensile

从图 4 可以看出,沿织物拉伸方向的纱线受到的力远远大于非拉伸方向纱线。沿着经纱方向拉伸时,在经纱拉伸方向上,经纱承受了绝大部分

的拉力,纬纱仅受到了经纬纱相互摩擦产生的摩擦力,这个摩擦力与经纱和纬纱间的摩擦因数有关<sup>[10]</sup>。从图 4 还可以看出,应力主要集中在经纬

纱交界处,这是因为当织物受到拉伸时,拉伸方向的纱线屈曲被伸直,带动非拉伸方向的纱线更加屈曲,非受拉纱线给受拉纱线一个反作用力,使得经纬纱间应力较大,织物在经纬纱交界处更易断裂。

### 3 织物拉伸试验验证

织物拉伸断裂试验时,使用扯边纱条样法,将试

样剪成宽度为40 mm,扯去两边边纱后,最终宽度为25 mm,试样长度为200 mm,测试夹持长度为100 mm,每种试样制作5条经向样布。使用Instron万能试验仪对织物经向进行拉伸性能测试,设置拉伸速度为100 mm/min,预加张力为5 N,每种样布经向测试5次。Instron测试得到的织物应力-应变曲线,以及Ansys模拟提取值经转化得到的应力-应变曲线,如图5所示。

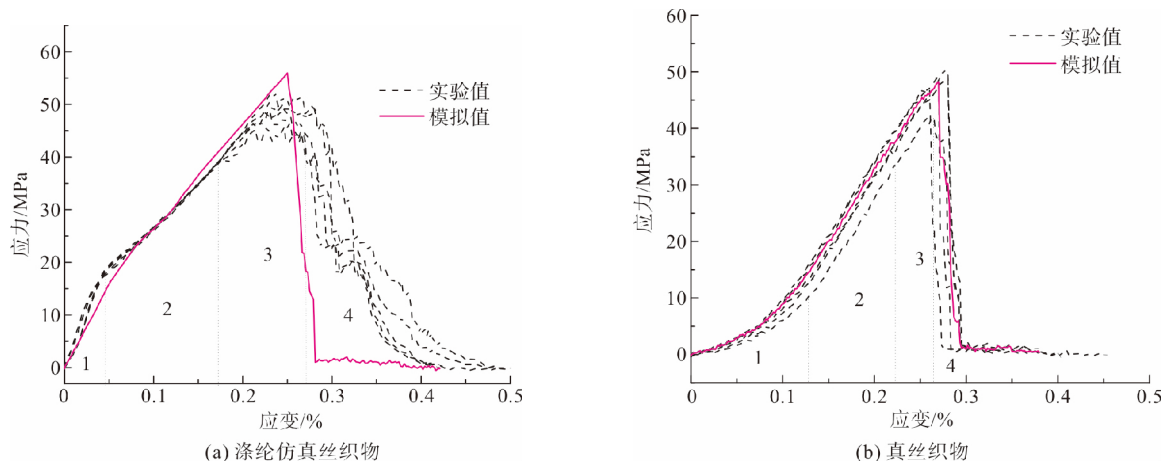


图5 织物拉伸性能有限元模拟与试验对比

Fig. 5 Comparison of tensile mechanical properties on silk fabrics and polyester silk-like fabrics

由图5可以看出,涤纶仿真丝和真丝织物的应力变化范围大致相同,最大应力相差不大,但拉伸过程中的应变-应力变化趋势有所差异。图5(a)涤纶仿真丝织物的实际拉伸过程总体分为4个阶段:第1阶段主要是涤纶织物的弹性变形区域,纱线承受的应力迅速增加;第2阶段主要是涤纶织物的屈服变形区域,织物所受力超过了屈服应力,纱线被拉细;第3阶段主要是由于纱线和纤维断裂的不同步性,造成该阶段应力波动;第4阶段是绝大部分纱线断裂,织物最终断裂。图5(b)真丝织物的拉伸过程总体可分为4个阶段:第1阶段是真丝织物中拉伸径向纱线由屈曲到伸直的过程;第2阶段是真丝的弹性变形部分,被伸直的纱线承担更多的应力;第3阶段是由于纱线断裂的不同步性,该阶段曲线的斜率略小于第2阶段;第4阶段涉及绝大部分纱线断裂,织物最终断裂。

涤纶仿真丝与真丝拉伸曲线趋势在第1阶段和第3阶段明显不同,其中第1阶段不同是因为,涤纶有较高的初始模量,抵抗外力变形的能力较好,在受到外界拉力时,其承受的应力增加较快;而真丝织物因为织效用,长丝屈曲较多,在拉伸的初始阶段表现

为长丝的屈曲伸直过程。另外第3阶段不同是因为,涤纶仿真丝织物的长丝伸长性较好,使得纱线断裂时更随机,应力波动较大;而真丝断裂时,相对更集中统一,断裂时应力波动较小。

对比涤纶仿真丝的试验拉伸曲线和模拟拉伸曲线,织物拉伸的第1阶段,试验值大于模拟值,这是因为在实际织物拉伸试验时,给了织物必要的预加张力,纱线在一定程度上被拉直,在同样的应变情况下,试验曲线比模拟曲线有更大的应力。织物拉伸到了第2、3阶段,在相同的应变下,试验应力值逐渐小于模拟值,这是因为模拟时,纱线选用的是弹性材料模型,而实际上纱线的断裂是随机的。织物拉伸的第3阶段,试验应力值出现波动,而模拟值呈现近乎脆性的断裂,这是因为模拟过程中织物建模时每根纱线是一个整体,实际上纱线是由若干纤维构成的,拉伸断裂会呈现不同步性。进一步对比真丝的试验拉伸曲线和模拟拉伸曲线,两者曲线基本吻合。综合来看,有限元模拟织物拉伸断裂具有可行性。

### 4 结论

本文借助超景深数码显微镜VHX-5000观察并

测量纱线和织物的几何构型参数,利用制图软件 AutoCAD建立织物系统的有限元模型。基于有限元软件 Ansys 对真丝和涤纶仿真丝织物进行拉伸力学性能的仿真,最后将仿真结果与试验结果相比较,发现织物拉伸模拟曲线与试验曲线总体趋势大致相同,涤纶仿真丝和真丝织物的拉伸曲线在拉伸初始阶段和断裂阶段有明显差异。本文证明了有限元仿真分析的有效可行性,为有限元分析织物的其他性能提供了依据。

#### 参考文献:

- [1]周建仁,张继民,韦伟,等.真丝床上用品面料的性能研究[J].丝绸,2014,51(5):54-57.  
ZHOU Jianren, ZHANG Jimin, WEI Wei, et al. A study on performance of real silk bedding fabrics [J]. Journal of Silk, 2014,51(5):54-57.
- [2]何爱婷,方玲珍,陈杏元.涤纶仿真丝产品生产探讨[J].合成纤维工业,1993,16(1):21-24.  
HE Aiting, FANG Lingzhen, CHEN Xingyuan. Study on the production technology of silk-like polyester fabrics [J]. Synthetic Fiber Industry,1993,16(1):21-24.
- [3]李焰,谭磊.服用机织物力学性能各向异性的分析[J].纺织学报,2003(2):118-120.  
LI Yan, TAN Lei. A study of anisotropic mechanical properties of apparel woven fabrics [J]. Journal of Textile Research,2003(2):118-120.
- [4]肖继海,崔晓红,戴晋明. BP神经网络在织物性能预测中的应用与研究[J].电脑与信息技术,2008,16(6):29-33.  
XIAO Jihai, CUI Xiaohong, DAI Jinming. The research and application of predicting fabric property with BP neural network [J]. Computer and Information Technology,2008,16(6):29-33.
- [5]BADEL P, MAIRE E, VIDAL-SALLE E, et al. Mesoscopic mechanical analyses of textile composites: validation with X-ray tomography [J]. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics,2010,50(2):71-78.
- [6]ROLICH T, SAJATOVIC A H, PAVLINIC D Z. Application of artificial neural network (ANN) for prediction of fabrics' extensibility [J]. Fibers and Polymers,2010,11(6):917-923.
- [7]施晨阳,潘志娟.涤纶塔夫拉伸过程的动态分析与机制研究[J].纺织学报,2012,33(11):47-52.  
SHI Chenyang, PAN Zhijuan. Dynamic analysis and mechanism study of drawing process of polyester taffeta [J]. Journal of Textile Research,2012,33(11):47-52.
- [8]张天阳.机织物防刺性能的有限元分析[D].上海:东华大学,2011:1-29.  
ZHANG Tianyang. Stab Resistance Behaviors of Woven Fabrics by Finite Element Analysis [D]. Shanghai: Donghua University,2011:1-29.
- [9]马倩.机织物撕裂破坏机理的有限元分析[D].上海:东华大学,2010:8-14.  
MA Qian. Finite Element Analyses of Woven Fabrics Tearing Damage [D]. Shanghai: Donghua University,2010:8-14.
- [10]程建芳,肖露,柴晓明,等.有限元分析法研究 Kevlar 129 纱线及织物的拉伸性能[J].浙江理工大学学报,2013,30(5):649-653.  
CHENG Jianfang, XIAO Lu, CHAI Xiaoming, et al. Study on tensile property of Kevlar 129 yarn and fabric with finite element analysis method [J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University,2013,30(5):649-653.