

# 基于 ANSYS CFX 的织物透气性数值计算

代文杰, 邱 华, 杨恩惠, 王 宁, 闫正林

(江南大学 生态纺织教育部重点实验室 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 为了快速设计出透气性符合实际要求的织物, 并研究气流在织物内部的运动和压力、压强的变化规律, 文章提出了利用 ANSYS CFX 对织物透气性进行数值计算的方法。首先建立织物模型, 再在此基础上对织物模型进行处理, 然后对不同压强下的织物进行数值计算。结果表明: 气流主要通过织物孔隙和纱线之间的间隙, 并且通过孔隙时由于迁移加速度的存在速度会增加; 通过空隙时在纱线表面会存在很大的剪切力和压力; 模拟值与实验值进行比较得到的模拟误差小于 16%, 所以得到的模型可以反映织物的实际特征。造成误差的主要原因包括: 测试偶然误差、模型参数误差、边界条件与测试条件之间的差别。

**关键词:** 织物模型; 布尔运算; ANSYS; 网格; 有限元

中图分类号: TS101.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-7003(2018)09-0051-06

引用页码: 091108

## Numerical calculation of fabric air permeability based on ANSYS CFX

DAI Wenjie , QIU Hua , YANG Enhui , WANG Ning , YAN Zhenglin

(Key Laboratory of Eco-Textiles , Ministry of Education , Jiangnan University , Wuxi 214122 , China)

**Abstract:** In order to rapidly design fabrics whose air permeability meets the actual requirements , and study the changing rules of movement , pressure and pressure intensity of air flow inside the fabric , a method was proposed to numerically calculate the air permeability of fabric by using ANSYS CFX. Firstly , the fabric model was established and processed. Then , the fabrics are numerically calculated under different pressure intensity. The results show that the airflow mainly passed through the gap between the fabric pores and the yarn , and the speed would increase due to the migration acceleration when passing through the pores. There is large shear force and pressure on the yarn surface when passing through the voids. The simulation error obtained by comparing the simulation value with the experimental values was less than 16% , so the model can reflect the actual characteristics of the fabric. The main causes of errors include: accidental errors of test , model parameter errors , and differences between boundary conditions and test conditions.

**Key words:** fabric model; Boolean operation; ANSYS; grid; finite element

织物的透气性表示气流在一定压差下通过织物后气流的速度, 与织物的保暖性和舒适性密切相关; 也会影响空气过滤材料的过滤效能; 影响到衣服与空气和水之间能量传递, 从而影响洗涤和晾晒的效

率。所以, 研究气体或者液体在织物内的流动特征具有重要的意义。

姚穆等<sup>[1-2]</sup> 研究得出织物内部存在较多孔隙, 孔隙主要包括: 纱线之间、纤维之间, 以及多层织物之间, 其中纱线之间和层与层之间的孔隙对织物透气性影响最大。S. Jaganathan 等<sup>[3-4]</sup> 利用 2D 的图像中像素不同生成 3D 的纤维束模型, 以及为了提高模拟的准确性应该添加周期性网格, 并假设气流在纤维束内进行层流流动, 得到气流在纤维束内的流动状态。陈晓东等<sup>[5]</sup> 利用 FLUENT 软件并选用 porous

收稿日期: 2017-12-19; 修回日期: 2018-06-28

基金项目: 江苏省产学研项目 (BY2016022-14); 江南大学创新计划项目 (2017234Y)

作者简介: 代文杰 (1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为织物在流体中的数值计算和受力分析。通信作者: 邱华, 教授, qiuhua@jiangnan.edu.cn。

jump 作为织物模型,对层叠织物进行流体分析,得到织物透气性按照幂函数的规律随着层数的增加而减小;实现了对多层织物透气性的预测。肖学良等<sup>[6]</sup>主要研究织物在高压下织物厚度会减小,并且压力与厚度之间满足一定的函数关系。当织物受到压力,松散织物厚度会减小,但是织物的体积分数变化不明显,织物透气性会增加;紧密织物厚度变化较小,织物体积分数会变大,孔隙数量减小,织物透气性变化较小<sup>[7]</sup>。

综上,先前研究主要总结了织物的内部结构及影响织物透气性的因素;而且利用流体软件对织物的透气性进行模拟计算。但是只对织物的透气性进行定性研究,并且主要集中在非织造织物,没有涉及机织物并且不能具体分析气体在织物内部的分布和流动特征,不能用于机织纺织品设计和开发。

因此,本文首先通过显微镜观察得到纱线在织物内的曲屈状态,得到符合织物真实情况的模型。然后利用 ANSYS-CFX 对织物进行流体模拟计算,得到气流在织物内部的流动路径、流动过程中压强和速度的变化,以及织物在气流中的受力状态,得到的结果可以用于纺织品的设计和开发。

## 1 织物建模

### 1.1 织物几何结构

实验试样采用了较为常见的平纹织物,因为平纹织物具有较好的尺寸稳定性、织造工艺简单,适用于大多数的服用织物和产业用纺织品;其次,织物透气性的大小主要与纱线之间的空隙的大小和数量有关,组织结构对其影响不大,所以采用平纹织物作为研究对象,规格见表1。

表1 织物的规格参数

Tab. 1 The specifications and parameters of fabric

织物组织	纱线特数/tex	经纬密度/(根·cm <sup>-1</sup> )	织物厚度/mm
平纹组织	45	25.5	0.36

纱线在织物内部会被周围的纱线压扁并呈现出椭圆或者其他不规则的截面,所以很难直接定义出截面形状,然而利用超景深仪进行放大可以直接得到纱线的真实截面形态。

在观察纱线在织物内状态时,取样应遵循“随机取样”的原则,利用超景深三维数码显微镜(VHX-5000),选择一个基本单元测量纱线在一个方向上的尺度,如图1所示。

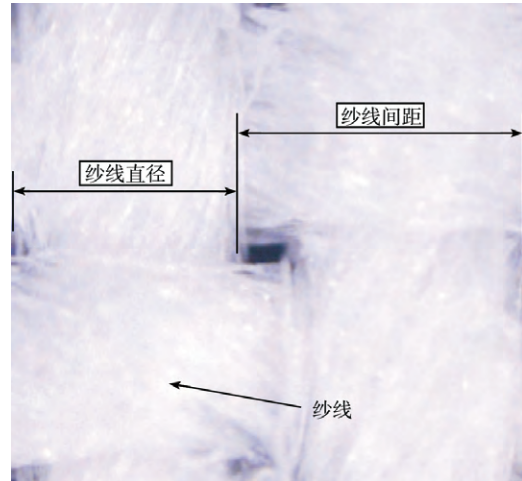


图1 织物显微镜下照片

Fig. 1 Micro-photo of the fabric

### 1.2 构建模型

织物主要由纱线在经纬组织点上下交错而形成,构建织物模型首先需要构造出纱线在织物内的弯曲形式,纱线在织物内的结构很复杂并且曲率变化很大。所以,构建织物模型要从纱线中心线开始,主要包括:构建纱线轴心线、纱线横截面、确定纱线之间的配合这三个步骤。

构建织物应从构建纱线开始,为了保证纱线在轴向顺滑,轴心线必须采用插值函数<sup>[8]</sup>。根据纱线直径、空隙的大小及厚度和组织结构确定  $P_0$ 、 $P_1$ 、 $P_2$  的四个特征点,然后利用三切线定理(图2)和贝塞尔曲线公式,即式(1)得到纱线的轴心线<sup>[9]</sup>。根据纱线的直径、织物厚度并利用式(2) — (3) 得到纱线的横截面为类椭圆形,如图3所示。

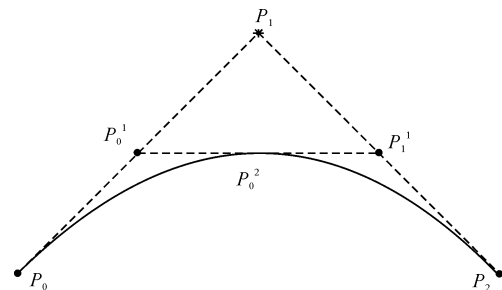


图2 三切线定理示意

Fig. 2 Schematic diagram of three tangent lines

$$B(t) = P_1(1-t)^3 + 3P_2t(1-t)^2 + 3P_3t^2(1-t) + P_4t^3 \quad (1)$$

$$C(t) \ x = \frac{\omega}{2} \cos(2\pi t) \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (2)$$

$$C(t) \ y = \frac{h}{2} \sin(2\pi t) \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (3)$$

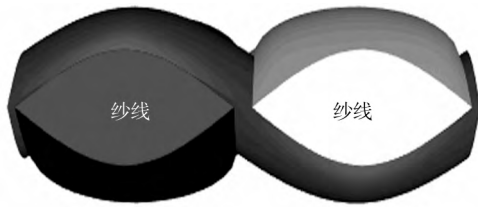


图 3 织物模型的横截面  
Fig. 3 Cross section of the fabric model

## 2 织物模拟计算

### 2.1 模型前处理和网格划分

流体分析主要利用有限元分析,在网格的节点上进行迭代计算,所以流体主要通过有网格的部分。因此,必须对模型进行 Boolean 运算(目标体包括流体域和四根纱线,工具体为四根纱线)将织物内纱线删减掉,得到气体的流动区域。

网格是模拟计算的基础,网格的质量直接影响迭代计算速度和收敛情况<sup>[10]</sup>。Mesh、ICEM CFD、GAMBIT 都可以进行网格划分,不同软件得到的网格具有不同的特点,根据网格形成部位可以分为:面网格、体网格和膨胀层网格。首先应该设置应用场为 CFX 流动场,Relevance 用于控制网格划分的质量,值越小网格越粗糙,质量越差;反之质量越好。由于纱线在织物内弯曲形式复杂,并且本来气流经过边缘和弯曲时会形成杂乱的气流,在这些位置必须提高网格密度来更好地捕捉气体分子的运动状态<sup>[11]</sup>,所以要形成膨化层来提高网格密度,如图 4 所示。

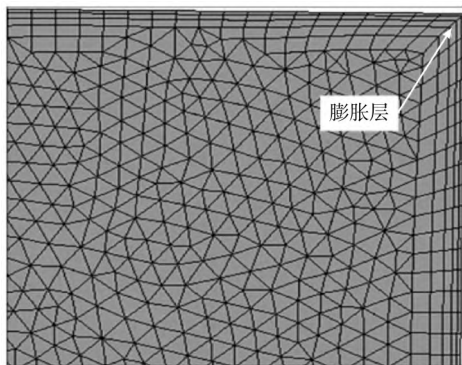


图 4 膨胀层划分网格  
Fig. 4 Expanded layer division grid

## 3 边界条件及控制方程

### 3.1 边界和参数设置

边界条件包括:进口、出口和壁面等边界条件。参数包括:速度、质量流速和压强等参数,每种参数

有  $x$ 、 $y$ 、 $z$  不同作用方向。进口边界类型: opening, 属性值: 0 Pa; 出口边界类型: opening, 属性值: -100 Pa (以压差为 100 Pa 为例); 壁面边界类型: wall, 属性: No slip wall, 使纱线表面的流动速度为 0 m/s, 模拟出纱线表面复杂的毛羽作用(图 5)。

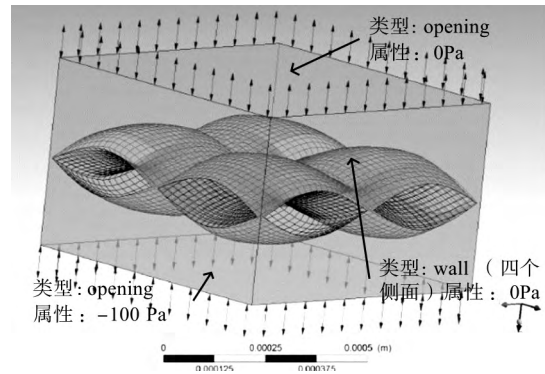


图 5 边界条件和参数设置

Fig. 5 Boundary conditions and parameter settings

### 3.2 控制方程

有限元网格划分会将整个模型分解成单个的网格,通过分别计算每个网格后得到整个模型的数据,整个计算过程必须保持能量和动量守恒等定律<sup>[12]</sup>,如式(4)~(8):

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (4)$$

量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) - \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla U) \\ = -\nabla P' + \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla U)^T \end{aligned} \quad (5)$$

能量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho h_{\text{tot}})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{\text{tot}}) \\ = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_E \end{aligned} \quad (6)$$

态方程:

$$P + P_{\text{atm}} = \rho R T \quad (7)$$

$k - \varepsilon$  方程:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla g (\rho U k) = \nabla g \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (8)$$

式中: $\rho$  为密度,  $t$  为时间,  $U$  为流体速度矢量,  $\mu_{\text{eff}}$  为等效黏度,  $h_{\text{tot}}$  为总焓,  $P$  为静压(表压),  $\nabla$  为导热系数,  $T$  为绝对温度,  $\tau$  为应力,  $S_M$  为动量源,  $S_E$  为能量源,  $P_{\text{atm}}$  为大气压强( $P_{\text{atm}} = 0.10103 \text{ Mpa}$ ),  $R$  为普适气体常数,  $k$  为湍流动能,  $\mu$  为黏性,  $\mu_t$  湍流黏性系数,  $\sigma_k$ 、

$\sigma_z$ 、 $C_{zL}$ 、 $C_z$  为常量  $P_k$  为剪切湍动能  $\epsilon$  为紊流耗散率。

## 4 模拟计算结果

### 4.1 气流的流动路径

图 6 为织物内气流的速度变化和流动路径分布,其中的实体为织物内的纱线,流线为气流的流动路径。流体域内由于纱线的存在,气流会首先通过容易通过的位置<sup>[6]</sup>,所以气流流动的路径主要集中在织物内纱线之间的间隙。另外,织物内的纱线表面状态为 No slip wall,气体分子之间存在黏度,气流的流动区域近似于锥形,经过纱线的间隙后压强会减小,会形成类似于漩涡的流动形式。

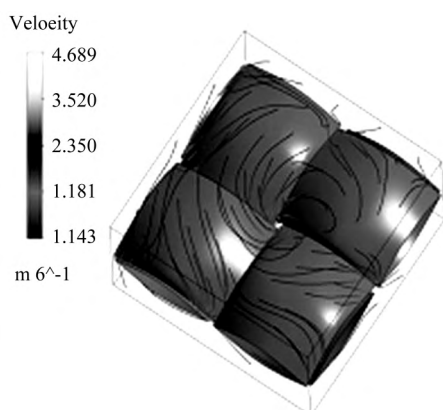


图 6 气流通过织物的路径

Fig. 6 The path of the air passing through the fabric

### 4.2 织物内气体的流动特征

图 7 为气流经过织物时,气流对织物内纱线表面的压力分布;图 8 为气流经过织物时,气流分子对织物内纱线的剪切力分布。织物模型包括锥形流体域和纱线体,内部纱线会对气体的流动产生阻碍作用。当气体通过织物时,根据前文得出气体分子会首先通过纱线之间的孔隙,大量气体分子会集中在织物的孔隙,气体分子的增加会使纱线表面压强增大并且产生剪切力。

由图 7 可以得出,压强在织物内的纱线上分布比较均匀,在织物的孔隙处由于气体分子的运动压强变化较大;由图 8 可以得到织物表面剪切力的分布,在织物表面剪切力分布较小,在织物孔隙处剪切力较大。所以在设计纺织品时,特别是结构松散的织物,如蜂巢织物、网目织物时,为了防止剪切力过大对织物造成破坏,在孔隙处需要采用较大的经纬密度或者选用强力大的纤维包裹其他纤维,以保证织物在流动的气体中不会发生破损和断裂。

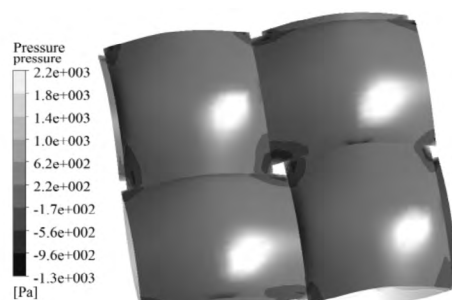


图 7 织物表面的压力分布

Fig. 7 Pressure distribution on the fabric surface

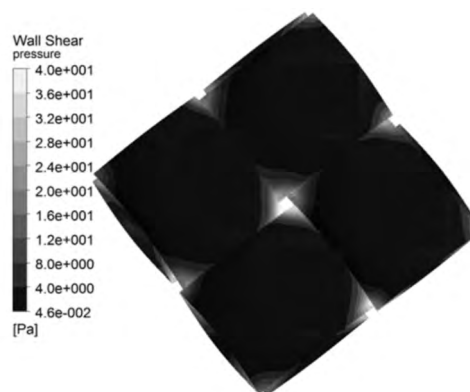


图 8 织物表面剪切力的分布

Fig. 8 Distribution of shear force on fabric surface

### 4.3 织物内气体的流动速度

图 9 为气流在织物孔隙处横截面上的速度变化,其中空白处表示纱线的横截面,气流无法通过。当高温气体经过潮湿织物表面时,会将表面的水分子或者蒸发的水分子带离织物表面,以达到对织物干燥的目的。所以,气流速度的大小会影响织物的导热、导湿和干燥的作用,了解气流在织物内速度的变化对于开发和设计保暖透气织物具有重要意义。由于气流在流动的过程中不会发生相变,所以气体流动可以近似看作定常流。

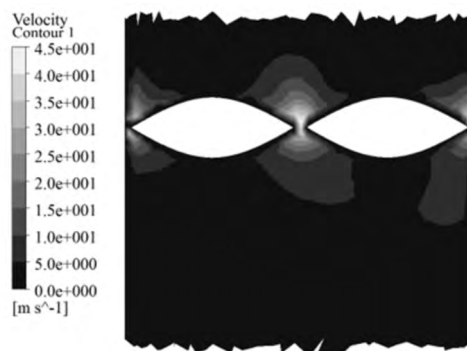


图 9 织物速度分布

Fig. 9 Fabric velocity distribution

由图 9 可知,气流在进入织物前由于压强变化较大、气体的流动面积减小,会产生一定的迁移加速度,并且加速度与气体运动方向相同,所以气流速度会增加;通过织物后压差较小,流动面积增加,流动速度会减小。由此,在设计多层气体过滤材料时,应该注意气体经过第一次过滤后,气流大小会改变,方向会发生分散;为了防止气流对第二层过滤材料结构造成影响,应该注意两层过滤材料之间的距离,如果过小会对第二次过滤材料冲击过大,影响后续的过滤效果。

## 5 实验数据和模拟数据比较

### 5.1 透气性测试

根据 GB/T 5453—1997《纺织品 织物透气性的测定》的国家标准,即服用织物采用 100 Pa; 产业用纺织品采用 200 Pa。为了测试具有普遍适用性,以及得出压差与透气性之间的关系,利用 YG(B) 461-E 型织物透气测试仪(温州市大荣纺织仪器有限公司)分别测试了 50、75、100、125、150、175、200、225、250、275、300 Pa 等不同压差下织物的透气性,分别测试 15 次,最后取均值。实验所测试数据与模拟数据之间的比较见表 2。

表 2 实验测试数据与模拟数据误差

Tab. 2 Error between experimental test data and analog data

压差/Pa	测试值/( $m \cdot s^{-1}$ )	模拟值/( $m \cdot s^{-1}$ )	误差/%
50	48.93	46.784 30	-4.38
75	68.48	68.046 14	-0.64
100	81.01	88.221 48	8.90
125	96.66	107.547 15	11.26
150	111.52	126.100 33	13.07
175	126.59	144.001 82	13.76
200	142.55	161.330 20	13.18
225	153.08	177.998 01	16.28
250	174.81	189.487 94	8.40
275	187.78	210.422 07	12.05
300	204.88	225.961 50	10.29

### 5.2 数据对比和误差分析

利用 ANSYS 有限元软件对模型进行模拟计算得出织物的透气性。通过对比模拟值和实验值得出,当压差小于 225 Pa 时,透气性随着压差的增大而增加的效果比较明显;当压差大于 225 Pa 时,透气性的增加量降低。分析认为,主要是因为当压差增大后织物在进行测试时会存在下凹现象<sup>[11]</sup>,这种现象

会导致织物紧密度增加,透气性的增加量会减小。

通过对织物进行有限元分析,得到织物在气流内部的受力状态,虽然模拟值和受力值之间有 16% 的误差(图 10),但是在可以接受的范围。造成误差的因素主要包括:1) 实验参数的误差,即实验数据的采集过程存在主观的判断,会使织物模型与实际情况存在偏差。2) 网格的质量不好。3) 模型简化为刚体材料,忽略毛羽效应的影响。4) 边界条件的设定与实际环境之间的差别,即测试时织物两边的压差处于一个动态变化的数值<sup>[13]</sup>,而模拟过程中保持静态压强所以得到的值会偏大。

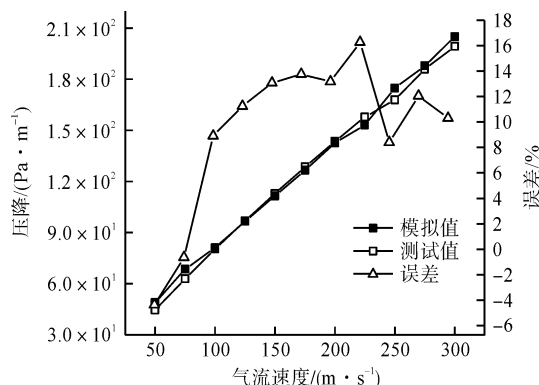


图 10 实验值和模拟值之间误差

Fig. 10 Error between experimental value and simulated value

另外,有限元软件大多用于机械设计中,因织物组织的尺度较小,在模拟计算中可能会存在一定的误差;由于织物受到外力的作用下,在同一块布料不同位置经纬密度会不同,测试取样位置有限。同时,由于织物建模的参数是综合多组数据的平均值,所以模拟值可以反映整块布料。虽然测试值只代表一部分,但是两者产生一定的误差是可以接受的。

## 6 结论

根据贝塞尔和三切线定理,以及利用织物内纱线的直径和织物厚度构成等参数构建出织物模型。利用 ANSYS-CFX 对织物透气性进行模拟计算,得到织物的上下表面存在一定压差时,在孔隙的周围压强的变化会很剧烈;在通过织物时气流的速度先增大后减小;气流的运动会对纱线产生一定力的作用,在空隙的应力和剪切力较大。由于实验参数、网格质量和纱线材料等因素使透气性的模拟值存在一定的误差,但是利用有限元模拟气流在织物内部的流动,可以得到织物内部压力和气流的速度变化及纱线的受力变化,对织物设计具有一定的意义。

参考文献:

- [1]姚穆,施楣梧,蒋素婵. 织物湿传导理论与实际的研究 第一报: 织物的湿传导过程与结构的研究[J]. 西北纺织工学院学报, 2001, 15(2): 1-4.  
YAO Mu, SHI Meiwu, JIANG Suchan. The research on the theory and practice of wet permeability of fabrics I: research on the wet permeability process and fabric structure [J]. Journal of Northwest Institute of Textile Science and Technology, 2001, 15(2): 1-4.
- [2]姚穆,施楣梧. 织物湿传导理论与实际的研究 第二报: 织物湿传导理论方程的研究[J]. 西北纺织工学院学报, 2001, 15(2): 9-14.  
YAO Mu, SHI Meiwu. The research on the theory and practice of wet permeability of fabrics II: theoretical equations of wet permeability of fabrics [J]. Journal of Northwest Institute of Textile Science and Technology, 2001, 15(2): 9-14.
- [3]CHUANG C J. CFD analysis on fluid flow through multifilament woven filter cloths [J]. Separation Science & Technology, 2002, 37(4): 799-821.
- [4]JAGANATHAN S, TAFRESHI H V, POURDEYHIMI B. A realistic approach for modeling permeability of fibrous media: 3-D imaging coupled with CFD simulation [J]. Chemical Engineering Science, 2008, 63(1): 244-252.
- [5]陈晓东,周云成,王德鹏. 叠层织物透气性的宏观流体分析[J]. 毛纺科技, 2016, 44(5): 5-8.  
CHEN Xiaodong, ZHOU Yuncheng, WANG Depeng. Analysis of the laminated fabric air permeability using macroscopic fluid method [J]. Wool Textile Journal, 2016, 44(5): 5-8.
- [6]XIAO X L, HU J L, HUA T, et al. Through-thickness air permeability of woven fabric under low pressure compression [J]. Textile Research Journal, 2015, 85(16): 1632-1635.
- [7]XIAO X L, LONG A, QIAN K, et al. Through-thickness permeability of woven fabric under increasing air pressure: theoretical framework and simulation [J]. Textile Research Journal, 2017, 87(13): 1631-1642.
- [8]史永高. 基于粒子系统的三维纱线及织物模拟[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2015: 5-6.  
SHI Yonggao. 3D Yarn and Fabric Simulation Based on Particle System [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2015: 5-6.
- [9]SHERBURN M. Geometric and Mechanical Modelling of Textiles [D]. Nottingham: University of Nottingham, 2007: 15-20.
- [10]袁国勇. ANSYS 网格划分方法的分析[J]. 现代机械, 2009(6): 59-60.  
YUAN Guoyong. Analysis of meshing dirision method [J]. Modern Machinery, 2009(6): 59-60.
- [11]刘平. ANSYS 网格划分精度与计算精度[C]. 成都: 2016 年中国水产学会学术年会, 2016.  
LIU Ping. Precision and accuracy of ANSYS meshing [C]. Chengdu: 2016 Annual Meeting of Chinese Society of Fisheries, 2016.
- [12]付玉叶. 旋流器内部气流对毛羽作用机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014: 20-21.  
FU Yuye. Study on the Mechanism of Airflow Effect on Hairiness in Cyclone [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014: 20-21.
- [13]WANG Q, MAZÉ B, TAFRESHI H V, et al. A note on permeability simulation of multifilament woven fabrics [J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(24): 8085-8088.