

机织物透气性研究进展

杨恩惠¹, 沈海生², 邱华^{*1}

(1. 江南大学生态纺织教育部重点实验室, 江苏无锡 214122; 2. 南通赛晖科技发展有限公司, 江苏南通 226000)

摘要:分析纤维种类、纱线规格、纱线交织状态、织物紧密程度与厚度以及织物后整理等因素对织物透气性的影响, 总结影响因子量化方法, 使之与透气性建立关系, 归纳建立机织物三维模型的不同方法, 并进行优势比较。分析认为, 利用 TexGen 软件建立机织物三维模型并进行透气性分析将成为一种具有发展前景的方法。

关键词: 机织物; 透气性; 影响因子; 三维模型; TexGen 软件

中图分类号: TS 101.92.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-1928(2020)01-0006-06

Research Progress on Air Permeability of Woven Fabrics

YANG Enhui¹, SHEN Haisheng², QIU hua^{*1}

(1. Key Laboratory of Eco-Textile, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Nantong Saihui Technology Development Co., Ltd., Nantong 226000, China)

Abstract: In view of the research on the air permeability of woven fabrics, the effects of fiber types, yarn specifications, yarn interweaving state, fabric tightness and thickness, and fabric finishing on the air permeability of woven fabrics were analyzed. The methods of quantifying these factors were summarized to establish the relationship between them and air permeability. The different methods of building three-dimensional model of woven fabric were summarized and the advantages of each method were compared. The analysis shows that using TexGen software to build three-dimensional model of woven fabric and analyze the air permeability will be a promising method.

Key words: woven fabric, air permeability, influence factors, three-dimensional model, TexGen software

织物的透气性影响着服装的穿着舒适度和相关纺织产品的性能^[1]。舒适度是消费者在购买服装过程中需要考虑的首要条件, 炎热天气下, 服装面料良好的透气性有助于人体散热^[2]。此外, 服用织物一般需要洗涤以便再次使用, 洗涤后需使用干洗机对织物进行烘干, 而织物的透气性也影响其烘干效果, 因此研究织物透气性对改善干洗机性能也具有指导意义。特殊用途的织物(如宇航服、汽车安全气囊、降落伞和船帆等)则更需要保证其透气性, 确保安全使用^[3]。

机织服装作为日常穿着的衣物, 具有固形性好、外形挺括等优点^[4], 对其进行透气性研究有助于提高机织服装的舒适性。文中主要从织物透气

性的影响因素、研究方法及三维建模 3 方面进行文献综述, 并对研究前景进行展望。

1 织物透气性研究

1.1 影响织物透气性的因素

1.1.1 纤维和纱线层面 目前, 国内外对织物透气性的研究大多重点讨论影响织物透气性的因素^[5-7], 分析这些因素如何影响织物透气性, 并进行量化建立相关关系。就纤维种类而言, 张建祥等^[6]通过选用组织结构和厚度相似的棉、麻、羊毛、尼龙、涤纶 5 类织物进行透气性实验, 发现纤维素纤维和蛋白质纤维形成的织物透气性普遍优于化学

收稿日期: 2019-05-07; 修订日期: 2019-09-05。

作者简介: 杨恩惠(1994—), 女, 硕士研究生。

*通信作者: 邱华(1974—), 男, 教授, 硕士生导师。主要研究方向为纤维流体加工技术。Email: qiu hua@jiangnan.edu.cn

纤维,其中麻纤维织物透气性最好,尼龙纤维织物透气性最差,相同条件下麻织物的透气率是尼龙织物的2倍。总结得出:由于天然纤维的内部结构比化学纤维蓬松,因此天然纤维的透气性普遍优于合成纤维。就纱线捻度而言,在一定范围内,纱线捻度增加,织物的透气性增强。这是因为随着纱线捻度的增加,纱线结构更紧密,且表面的毛羽也会相对减少,有利于气体分子的通过;但如果捻度持续增加,纱线会扭曲卷绕,从而减小织物孔隙率,导致透气性降低。捻度会直接影响纱线纱支,所以经纬纱的纱支也影响织物的透气性。OGULATA T^[7]在控制经纬密及其他条件相同的情况下,比较经纬纱纱支对面料透气性的影响。实验结果显示,面料透气性会随着纱支的增加而增强,因为纱支越大意味着纱线越细,从而增大了织物的孔隙率。

1.1.2 织物层面 就织物紧密程度而言,织物越紧密,透气性越差。织物紧密程度可以从以下两点进行分析:①织物经纬密。陈妍等^[8]研究显示,在纱支不变的条件下,随着织物经纬密的增加,织物透气性呈下降趋势;OGULATA T^[7]的相关实验研究证明了该观点。②织物的交织状态(即织物组织)。陈妍等^[8]通过对蜂巢织物、缎纹织物、经重平织物、斜纹织物、平纹织物进行比较,发现在纬向密度一定时,其透气性依次递减,但当纬向密度处在中间水平(即180根/dm、210根/dm)时,经重平织物与斜纹织物的透气量相近。由此表明,不同组织形成的织物紧密度不同,因此不同机织物的透气性也不相同。张建祥等^[6]、陈丽丽等^[9]同样进行了不同组织织物透气性的比较,得出相同结论。就织物厚度而言,学者们一般以不同层数的同种织物进行研究^[10]。陈晓东等^[11]根据流体力学中多孔介质理论,将织物层数不断叠加并测试其透气性,使用Fluent软件进行分析,发现织物的透气性随织物厚度的增加而减小,并且呈幂律函数关系,且 $R^2=0.998$ 。织物厚度不仅影响织物孔隙率,在一定压力下还导致织物变形。XIAO X L等^[12]通过使用织物低气压压缩厚度测试仪、织物低气压徕卡显微镜观察仪和FX-3300透气性测试仪进行实验,建立厚度变形与外加气压的关系。结果表明,织物在气压<200 Pa时厚度变化较明显,气压>200 Pa时厚度变化不大。

1.1.3 织物后整理层面 织物后整理也对织物透气性影响较大^[13],因为后整理会作用在织物表面及内部,直接影响织物的孔隙率,若整理后孔隙率减小,则织物透气性降低,反之织物透气性增强。黄

时健^[14]研究发现,对纯棉织物而言,阻燃整理、树脂整理、拒水拒油整理、生物整理、涂层整理等均会使其透气性下降,其中涂层整理可使透气性降为零。这是因为整理剂可以与织物纤维缔合或附着在织物表面形成高分子膜,从而大大减小织物孔隙率,导致透气性下降。在显微镜下观察发现,经液氨整理后的棉纤维会变细,因此液氨整理可以增大织物的透气率。张建祥等^[6]通过分析液氨柔软、液氨免烫、液氨潮交联等几种不同液氨整理方法,发现液氨潮交联整理的织物透气性最强,且液氨柔软和液氨免烫织物的透气率比普通柔软和免烫织物高20%。

1.2 研究织物透气性的方法

影响织物透气性的因素较复杂,需将众多因素与透气性之间建立有效关系。纤维种类和结构对透气性有一定影响,但难以建立宏观关系,只能将纤维织物分类进行研究,因此织物组织结构是透气性实验的主要研究对象^[15]。

邱茂伟等^[16]利用哈根-泊肃叶定律推导出机织物纱线间孔隙透气量与织物结构参数的关系:

$$Q = (10p_j - 1)(10p_w - 1) \frac{\pi \Delta p}{128\mu L} \times \left[\frac{2(100/p_j - d_j)(100/p_w - d_w)}{(100/p_j - d_j) + (100/p_w - d_w)^4} \right] \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中: Q 为纱线间孔隙透气量(m^3/s); μ 为空气动力黏度($\text{Pa} \cdot \text{s}$); L 为空隙长度(m); Δp 为两表面压力差(Pa); d_j 为经纱表观直径(mm); d_w 为纬纱表观直径(mm); p_j 为经纱密度(根/dm); p_w 为纬纱密度(根/dm)。但预测值与真实测量值有很大误差,因此再利用逐步回归分析法进行拟合,得到织物透气性与理论值和织物紧度之间的线性方程:

$$Y = 495.84 + 0.416X_1 - 3.744X_2 \quad (2)$$

式中: Y 为透气量回归计算值($\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); X_1 为透气量理论值($\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); X_2 为织物总紧度(%)。通过式(2)间接分析无法从理论上阐明的影响因素。验证结果表明,式(2)能较精确地预测普通机织物的透气性。

对织物透气性的研究通常采用线性回归分析法^[17-19],而佐同林等^[20]尝试采用因子分析和聚类分析法。因子分析通过对多个自变量的提取,将原自变量综合成较少个数的互相独立且对因变量起支配作用的因子变量。采用因子分析法既不会丢失原有自变量信息,也可避免多重共线性现象的发生。聚类分析是将性质相近的研究对象进行分类,如研究不同规格精纺毛织物的透气性。通过聚类

分析法对 20 种精纺毛织物结构参数中 12 个与透气性密切相关的参数进行优化提取,综合出 4 个因子变量,分别是织物紧密程度、厚度、经纬交织结构相及纱线规格。佐同林等^[21]、赵玲^[22]曾利用主成分分析与回归分析相结合的方法,建立棉织物透气性预测模型。孙浪涛^[23]对纯棉机织物进行透气性预测,选取 32 种样本,采用 2 种流体力学的孔径计算方法计算织物理论透气率,建立理论透气率与实测透气率的相关性,回归方程相关系数可达 0.9884。

2 建立三维织物模型

通过实验和数据分析处理,可以初步了解织物主要参数对透气性的影响,建立三维模型可更直观理清相关参数与透气性之间的关系。建立织物三维模型有几种方法,其中最著名的是 20 世纪 30 年代的 Peirce 模型法^[24-25]。该模型假定织物中纱线既无伸长也无压缩变形,且经纬纱的横截面假定为圆形,纱线在经纬纱交织附近相互包覆屈曲呈现圆弧状,其余部分为直线状。在此基础上,建立了一系列关于纱线屈曲长度、波高、几何密度、直径、缩率与交织角的关系式。但该模型计算精度不高,因此后期逐步进行了修正完善。谷大鹏等^[26]在 Peirce 模型和坐标变换原理基础上,建立了平纹机织物纱线空间曲面模型、纱线空间曲面捻转模型和纱线纤维化曲面模型;又通过布尔矩阵和 MATLAB 语言对三维机织物进行快速建模^[27],将经纬纱分成 8 个组元,利用织物三维交织规律建立对应的布尔矩阵,并利用 MATLAB 和 MATLAB GUI 中的编程仿真程序将纱线组元矩阵转化为织物三维模型。组元曲面模型如图 1^[27]所示。图 1 中, $W_0 \sim W_7$ 为纱线拆分的 8 个组元。该方法适用于单层机织物各种组织的三维描述和模块化快速构建。

朱建华等^[28]针对多层织物的三维模型提出另一种方法,利用函数矩阵确定纱线中心轨迹并进行纱线截面拟合,使用 VC++ 编程语言调用 OpenGL 绘制出每根纱线,进行单纱的建模与仿真,针对三维织物的密度、厚度等信息绘制出三维织物模型,具体如图 2 所示。该方法适用于各种复杂组织的多层机织物建模与仿真,且建立的模型更接近实际情况。刘让同等^[29]针对传统机织物结构的不足,提出相对屈曲波高的概念来表征不同的纱线弯曲程度。英国诺丁汉大学设计开发的 TexGen 软件^[30-31]可以更简便地建立织物三维模型,具体如图 3 所示。

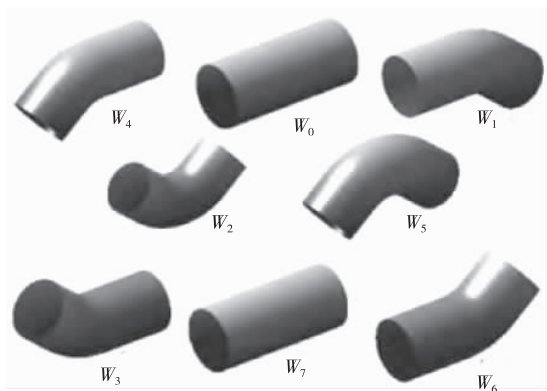


图 1 8 个组元曲面模型

Fig. 1 The 8 component surface models

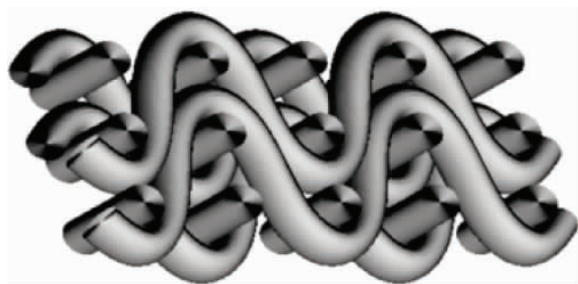


图 2 织物模型示意

Fig. 2 Fabric model diagram

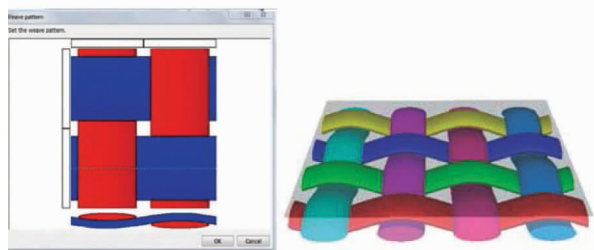
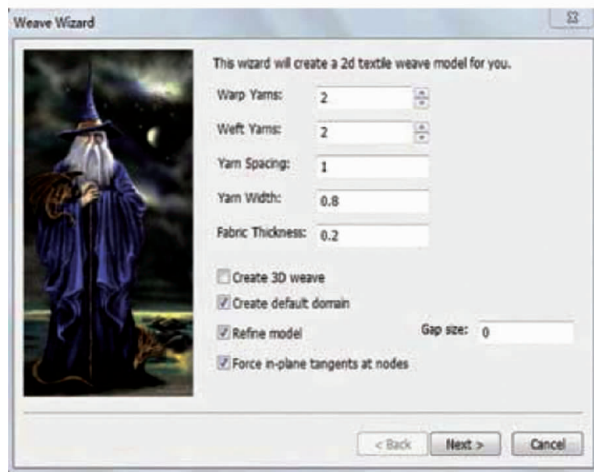


图 3 TexGen 建模示意

Fig. 3 TexGen modeling diagram

通过编织向导在界面中设置 yarn width, yarn space, fabric thick 等织物参数,直接构建织物三维模型,并设置纱线性能、纱线截面及表面卷曲度,经微调后使之更接近真实情况。TexGen 软件不仅能仿真单层织物,还能仿真多层复杂织物,最重要的是其构建的织物模型可以输出不同的文件格式,包括 CAD 格式、IGS 格式、STEP 格式、Surface Mesh 和 Volume Mesh 格式等,方便织物模型的后期分析处理。

3 存在问题与发展方向

根据国内外对织物透气性仿真研究的分析,发现影响织物透气性的因素多且复杂,很难把众多因素全部考虑在内,甚至有些因素不能进行量化,如纤维结构、纤维间空隙等,所以需要根据不同种类进行区分。虽然目前多数研究均表明纤维空隙也能一定程度上影响透气性^[32-33],但如何把纤维层面的影响量化仍是一大难题。在建立三维织物模型时,大多以纱线为结构单元,难以把纱线内部的纤维空隙表达出来,所以未来在机织物透气性三维仿真研究中,如何进一步考虑纤维间的空隙将是重点研究方向。

另外,在不考虑纤维间空隙的前提下,如何模拟纱线间的空隙是主要研究内容。ANGELOVA R A 等^[34]把存在压力差的织物两面纱线空隙看作喷气管道,分别模拟为圆形管道和矩形管道,比较两者间的差异。结果显示,两者差别不大,但就透气性而言,圆形管道略优于矩形管道。因此后续研究多以圆形管道模拟织物空隙。XIAO X L 等^[35-36]根据被压扁纱线的椭圆形截面模拟汇聚发散型通道,列出抛物线方程并积分求得空气流量,相比而言用此种方法得出的结果更接近真实情况。但如何更真实地模拟纱线间隙、纱线走势等细节,还需不断探索。

除了纤维孔隙和纱线间孔隙,在研究织物透气性过程中,织物表面毛羽也是一个重要影响因素。毛羽的浓密和长度一定程度上会影响织物的孔隙率和空气阻力,由此影响织物透气率。一般的数学模拟分析法基本没有考虑毛羽效果,在几何建模领域,由于技术问题也很难模拟出表面毛羽,所以未来在精确预测织物透气率时需重点研究织物毛羽。

4 结 语

在机织物透气性相关研究中,学者们已取得一

定成果,探讨了纤维种类、纱线捻度、纱线纱支、织物密度、织物交织状态、织物厚度以及织物后整理技术对织物透气性的影响,并且得出了一般规律。量化透气性影响因素的方法包括:①逐步线性回归分析法;②因子分析与聚类分析相结合法,通过找出主要影响因子,列出与透过织物气体流量相关的关系式。这些方法可以在理论上把织物组织结构参数与透气量联系起来,预测织物的透气性。建立织物三维模型时可以参考经典的 Peirce 模型,在此基础上用布尔矩阵和 MATLAB 语言进行三维模型的建立;也可以利用 VC++ 编程语言调用 OpenGL 绘制每根纱线,再绘制出三维织物模型;另外 TexGen 软件可快速构建织物模型,且能输出不同的文件格式方便分析。但如何建立与实际织物接近的模型,仍需不断学习探索。学者们对织物透气性三维仿真模拟的研究为后续探索织物透气性与织物结构参数之间的关系打下基础,以便精确预测织物透气性。

参考文献:

[1] 张海泉,张鸣,奚柏君,等. 纺织材料学[M]. 北京:中国纺织出版社,2013:272-273.

[2] 黄紫娟,崔春燕,潘晨阳. 毛织物透气性能与织物结构参数的灰色关联性[J]. 毛纺科技,2015,43(2):13-16. HUANG Zijuan, CUI Chunyan, PAN Chenyang. Grey correlation between permeability and structural parameters of wool fabric [J]. Wool Textile Journal,2015,43(2):13-16. (in Chinese)

[3] HALEEM N, MALIK Z A, MALIK M H, et al. Predicting the air permeability of polyester/cotton blended woven fabrics[J]. Fibers and Polymers,2013(7):1172-1178.

[4] 晏江,崔荣荣,邱华,等. 纯棉旋流纺纱线衬衫面料风格[J]. 服装学报,2016,1(3):262-266. YAN Jiang, CUI Rongrong, QIU Hua, et al. Research on hand of pure cotton shirt fabric made of swirl nozzle yarn [J]. Journal of Clothing Research,2016,1(3):262-266. (in Chinese)

[5] 徐瑶瑶,朱俐莎,杜磊,等. 棉织物透气性能的预测研究[J]. 现代纺织技术,2015,23(3):26-30. XU Yaoyao, ZHU Lisha, DU Lei, et al. Prediction of air permeability of cotton fabrics[J]. Advanced Textile Technology,2015,23(3):26-30. (in Chinese)

[6] 张建祥,王桂芝,崔金德,等. 纺织品透气性测试[J]. 印染,2009(23):42-44. ZHANG Jianxiang, WANG Guizhi, CUI Jinde, et al. Texting of air permeability of textiles [J]. Dyeing and Finishing, 2009(23):42-44. (in Chinese)

- [7] OGULATA T. Air permeability of woven fabrics[J]. Journal of Textile and Apparel, Technology and Management, 2006, 5(2): 1-10.
- [8] 陈妍, 谢光银. 纯棉织物的透气性能测试分析[J]. 纺织科技进展, 2013(4): 34-36.
CHEN Yan, XIE Guangyin. The air permeability of the cotton woven fabric[J]. Progress in Textile Science and Technology, 2013(4): 34-36. (in Chinese)
- [9] 陈丽丽, 楼利琴, 傅雅琴. 木棉纤维/棉混纺织物结构参数对其保暖透气性影响[J]. 纺织学报, 2018, 39(6): 47-51.
CHEN Lili, LOU Liqin, FU Yaqin. Effect of structural parameters of kapok fiber/cotton blended fabric on heat retention and air permeability [J]. Journal of Textile Research, 2018, 39(6): 47-51. (in Chinese)
- [10] SUNDARAMOORTHY S, NALLAMPALAYAM P K, JAYARAMAN S. Air permeability of multilayer woven fabric systems [J]. Journal of the Textile Institute, 2011(3): 189-202.
- [11] 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. (in Chinese)
- [12] 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): 1732-1742.
- [13] HAVLOVA M. Effects of finishing on the air permeability of woven fabrics[J]. Military Operations Research, 2013, 10(6): 507-513.
- [14] 黄时健. 功能性后整理对全棉织物透气性的影响[J]. 上海纺织科技, 2007, 35(5): 56-57.
HUANG Shijian. Effect of functional finish on air permeability of pure cotton fabric[J]. Shanghai Textile Science and Technology, 2007, 35(5): 56-57. (in Chinese)
- [15] 袁爱春, 高小华. 对纯棉织物的透气性能测试的分析和研究[J]. 纺织报告, 2016(11): 25-26, 38.
YUAN Aichun, GAO Xiaohua. Analysis and research on the permeability test of pure cotton fabric [J]. Textile Report, 2016(11): 25-26, 38. (in Chinese)
- [16] 邱茂伟, 王府梅. 机织物透气性能的预测研究[J]. 纺织学报, 2005, 26(4): 73-75.
QIU Maowei, WANG Fumei. Study on the prediction of woven fabrics air permeability [J]. Journal of Textile Research, 2005, 26(4): 73-75. (in Chinese)
- [17] 徐广标, 邱茂伟, 王府梅. 精纺毛织物的孔隙与结构及透气性的关系[J]. 毛纺科技, 2005, 33(4): 14-17.
XU Guangbiao, QIU Maowei, WANG Fumei. Study on the relationship between the structures, permeability and the pores of worsted fabrics [J]. Wool Textile Journal, 2005, 33(4): 14-17. (in Chinese)
- [18] 荆妙蕾. 轻薄型精纺毛织物的结构参数对其服用性能的影响[J]. 毛纺科技, 2006, 34(5): 48-51.
JING Miaolei. Influence of structure parameters of light weight worsted fabric on wearing characteristics [J]. Wool Textile Journal, 2006, 34(5): 48-51. (in Chinese)
- [19] 姜为青, 樊理山. 薄型精纺毛织物透气性与织物结构参数的关系[J]. 毛纺科技, 2007, 35(10): 45-47.
JIANG Weiqing, FAN Lishan. The relationship between the structural parameters and permeability of light-weight worsted fabrics [J]. Wool Textile Journal, 2007, 35(10): 45-47. (in Chinese)
- [20] 佐同林, 王晓清. 基于因子分析的精纺毛织物透气性能的系统聚类[J]. 毛纺科技, 2015, 43(3): 21-24.
ZUO Tonglin, WANG Xiaoqing. Cluster analysis of permeability of worsted fabric based on factor analysis [J]. Wool Textile Journal, 2015, 43(3): 21-24. (in Chinese)
- [21] 佐同林, 王立志, 王子鹤. 精纺毛织物透气性预测回归模型研究[J]. 纺织科技进展, 2014(6): 36-39.
ZUO Tonglin, WANG Lizhi, WANG Zihe. Study on the regression model of prediction on air permeability of worsted fabrics [J]. Progress in Textile Science and Technology, 2014(6): 36-39. (in Chinese)
- [22] 赵玲. 基于分形理论的哈根-泊肃叶公式的修正及在织物透气性研究中的应用[D]. 上海: 东华大学, 2010.
- [23] 孙浪涛. 纯棉机织物透气性预测[J]. 西安工程大学学报, 2018, 32(5): 495-501.
SUN Langtao. Air permeability prediction of cotton woven fabric [J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2018, 32(5): 495-501. (in Chinese)
- [24] PEIRCE F T. The geometry of cloth structure [J]. Journal of the Textile Institute Transactions, 1937, 28(3): 45-96.
- [25] 郑天勇, 吴珍, 赵媛媛, 等. Peirce 机织物几何结构模型的探讨[J]. 河南工程学院学报(自然科学版), 2014, 26(3): 1-5.
ZHENG Tianyong, WU Zhen, ZHAO Yuanyuan, et al. Study on peirce woven fabric geometry model [J]. Journal of Henan Institute of Engineering (Natural Science Edition), 2014, 26(3): 1-5. (in Chinese)
- [26] 谷大鹏, 杨育林, 范兵利, 等. 平纹机织物空间参数化模型及仿真[J]. 纺织学报, 2012, 33(10): 37-42.
GU Dapeng, YANG Yulin, FAN Bingli, et al. Space parametric model and simulation of plain woven fabrics [J]. Journal of Textile Research, 2012, 33(10): 37-42. (in

- Chinese)
- [27] 谷大鹏,杨育林,齐效文,等. 机织物三维仿真中组织模块化快速构建[J]. 纺织学报,2014,35(1): 134-138.
GU Dapeng, YANG Yulin, QI Xiaowen, et al. Fast modular construction of weave in woven fabric three-dimensional simulation[J]. Journal of Textile Research, 2014, 35(1): 134-138. (in Chinese)
- [28] 朱建华,张瑞云,王伟,等. 复杂组织多层机织物三维建模与仿真[J]. 玻璃钢/复合材料,2016(2): 47-52.
ZHU Jianhua, ZHANG Ruiyun, WANG Wei, et al. 3D modeling and simulation of multi-layer woven fabric with complex fabric weave[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2016(2): 47-52. (in Chinese)
- [29] 刘让同,李亮,刘淑萍,等. 机织物结构相模型剖析和修正[J]. 纺织学报,2017,38(10): 32-37.
LIU Rantong, LI Liang, LIU Shuping, et al. Analysis and modification of structure phase model of woven fabric[J]. Journal of Textile Research, 2017, 38(10): 32-37. (in Chinese)
- [30] 孙晓军,赵晓明,郑振荣,等. 新型织物仿真软件 TexGen 的特点及其应用[J]. 纺织导报,2013(4): 70-73.
SUN Xiaojun, ZHAO Xiaoming, ZHENG Zhenrong, et al. Introduction and application of a new fabric simulation software[J]. China Textile Leader, 2013(4): 70-73. (in Chinese)
- Chinese)
- [31] BROWN L P, ZENG X S, LONG A, et al. Recent developments in the realistic geometric modelling of textile structures using TexGen[C]//1st International Conference on Digital Technologies for the Textile Industries. Nottingham: University of Nottingham, 2013.
- [32] OGULATA T, MEZARCIOZ S. Total porosity, theoretical analysis, and prediction of the air permeability of woven fabrics[J]. Journal of the Textile Institute, 2011(11): 654-661.
- [33] LOLAKI A, SHANBEH M, BORHANI S. Effect of structural parameters of porous yarns and fabric on air permeability and moisture transfer of double-face woven fabrics[J]. Journal of the Textile Institute, 2016(7): 992-1000.
- [34] ANGELOVA R A, STANKOV P, SIMOVA I, et al. Three dimensional simulation of air permeability of single layer woven structures[J]. Central European Journal of Engineering, 2011, 1(4): 430-435.
- [35] XIAO X L. Modeling the structure-permeability relationship for woven fabrics[D]. Nottingham: University of Nottingham, 2012.
- [36] XIAO X L, ZENG X S, LONG A, et al. An analytical model for through-thickness permeability of woven fabric[J]. Textile Research Journal, 2012(5): 492-501.

(责任编辑: 沈天琦)