

基于ABAQUS的纬编针织物热传递有限元分析

孙亚博, 马崇启, 秦愈

(天津工业大学 纺织科学与工程学院, 天津 300387)

摘要:为探索针织物热舒适性设计的评估和优化新思路, 提供一种有效预测针织物热阻和表面温度变化的方法, 对织物系统一维热传递进行有限元模拟。基于对织物试样尺寸测量得到的几何结构参数, 利用三维建模软件Rhino建立纬编针织物的几何模型, 并考虑织物周围静止空气, 构成织物系统的三维模型; 借助ABAQUS有限元分析软件, 根据模拟环境设置载荷及边界条件, 求解模拟数值, 得到织物系统温度分布云图和热流图。最后将仿真结果和试验结果对比, 对数值模拟结果进行验证。结果表明: 织物外表面温度的模拟值与试验热阻值相对误差为2.62%, 两者吻合度较高, 证明有限元仿真的可行性; 相同针织物规格下, 羊毛和腈纶针织物热阻相差不大, 并且大于棉针织物。

关键词:热传递; 纬编针织物; 有限元仿真; 数值模拟; 热阻

中图分类号: TS 186.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-4033(2021)10-0012-04

ABAQUS Based Finite Element Simulation of Heat Transfer Properties of Weft Knitted Fabric

Sun Yabo, Ma Chongqi, Qin Yu

(School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: In order to explore new research approaches of knitted fabric design, evaluation and optimization of thermal comfort, an effective method for predicting the thermal resistance and surface temperature changes of knitted fabric was provided. The finite element simulation of heat transfer through fabric in one direction was investigated. On the basis of the measured fabric structure parameters, a geometric model of weft knitted fabric was established by a three-dimensional modeling software Rhino. The fabric system was assembled by fabric model and still air model around the fabric. The boundary conditions and the interaction were set according to simulation condition. The numerical solution, temperature distribution cloud diagrams and heat flow diagrams of fabric system were calculated by the finite element analysis software ABAQUS. Besides, the results of finite element simulation and experimental results were compared. The results indicate that the relative error of thermal resistance between numerical simulations and experiments is about 2.62%, which verifies the feasibility of finite element simulation. When the specifications of fabrics are similar, the thermal resistance of wool fabric is similar to that of acrylic fabric, and much larger than that of cotton fabric.

Key words: Heat Transfer; Weft Knitted Fabric; Finite Element Simulation; Numerical Simulation; Thermal Resistance

织物的热舒适性主要取决于其对热量和水分的传递效果, 织物中纱线的体积数量、空间结构、交叠方式等对织物内部温度传递具

有较大影响, 由于针织物结构特殊, 在贴身穿着时人体和外界环境通过针织物的纤维-空气层进行对流换热从而达到动态平衡^[1]。作为

调节人体和外界环境间热量交换的媒介, 热传递性能分析一直是评价针织物穿着过程中热舒适性的有效方法^[2]。

作者简介: 孙亚博(1996—), 男, 硕士研究生。主要从事针织物性能的有限元模拟研究。

通讯作者: 马崇启(1964—), 男, 系主任, 教授。E-mail: tjmcq@tjpu.edu.cn。

由于织物结构复杂多变,原料多样,热量交换在织物中的动态过程具有未知性和不稳定性,实际测量分析服用针织物热传递性能的难度较大。同时,对热传递性能的理论研究需要能量守恒定律的描述,计算基于一定假设,具有较强的复杂性。采用有限元方法进行热传递分析,通过计算机建立模型完成模拟的可视化表达,将复杂模型离散成有限子域进行简单运算,可以快速准确地综合求解织物温度分布,同时计算各单元热量损失和热流密度等相关物理参数,是物理学建模运算的有效方法。孙玉钗等^[3]将织物纤维-空气混合层作为一个均匀整体,通过 Marc Mentat 软件对针织物内衣热量对流传递进行有限元分析;吴佳佳等^[4]使用 ABAQUS 模拟人体穿着梭织物下一维热传递过程,预测系统热阻并绘制时间温度变化曲线;Fan et al^[5]通过施加边界条件计算多层仿生羊毛织物热通量分布和导热系数,优化织物传热性能;李瑛慧等^[6]利用 ANSYS 软件分别对黏胶仿真丝织物、涤纶仿真丝织物与真丝织物的热传导性质进行模拟,并对 3 种织物的热传导性能进行评价;Zheng et al^[7]基于五枚三飞纬面缎纹、双平纹和双斜纹玻璃纤维织物的织物单元模型进行有限元模拟,探讨不同组织梭织物的传热规律;耿长军等^[8]对同种组织多种纤维原料梭织物的热阻进行有限元运算,提出基于纱线材料的织物热传递模型。本文使用 3D 建模软件 Rhino 构建纬编针织物线圈模型,并与织物周围静止空气装配成织物系统模型,通过 ABAQUS 有限元软件以单元针织物为对象模拟针织物纤维-空气层热传递过程,预测不同材料针织物导热性能,为改

善针织物热传递性能提供理论方法,同时为服用针织物原料选择提供理论指导。

1 织物模型的建立

1.1 试样选取

试验采用纬平针织物,作为针织物最基本组织,其织造工艺简单,在服用织物中应用广泛。其次,针织物导热性能主要与纱线品种及织物厚度有关,组织结构对其影响不大,因此以纬平针作为研究对象^[9]。以市购纬编羊毛针织衫为建模对象,线密度 19.2 tex,织物横密 112.2 根/5 cm,纵密 132.7 根/5 cm,克质量 86.4 g/m²。

1.2 模型建立

针织物的几何结构可通过其最小重复单元进行表征,线圈是纬编针织物最小重复单元,单位线圈连续且均匀一致,通过相互串套约束具有一定的几何形态。为避免复杂运算,选取针织物线圈单元进行建模和运算表征。建立线圈模型需要线圈中心线几何参数,通过 VHX-5000 超景深数码显微镜,随机选取羊毛衫 5 处测量试样尺寸,标记线圈中心线型值点计算相对坐标,图 1 为线圈中心线,型值点坐标见表 1。

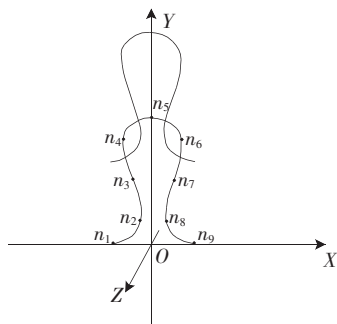


图 1 线圈中心线

本文使用三维建模软件 Rhino,并基于非均匀有理 B 样条(NURBS)曲线建立针织物线圈模型。在建模过程中,将纱线截面理想化为圆形,在减少模拟运算量的同时保证

表 1 线圈型值点相对坐标

型值点	坐标
n_1	$(-5.000, 0, 1.000)$
n_2	$(-1.500, 2.625, 0)$
n_3	$(-2.500, 7.625, -1.000)$
n_4	$(-3.500, 12.625, 0)$
n_5	$(0, 15.250, 1.000)$
n_6	$(3.500, 12.625, 0)$
n_7	$(2.500, 7.625, -1.000)$
n_8	$(1.500, 2.625, 0)$
n_9	$(5.000, 0, 1.000)$

模拟结果的真实性。首先键入型值点,使用 NURBS 曲线法均匀参数生成平滑的线圈中心线,以此确定纱线弯曲路径,然后沿线圈中心线扫描纱线圆形截面生成针织物线圈三维模型,模型如图 2a 所示。系统模型由织物及填充在纱线自由空间及包覆在外的空气组成。系统模型是一个完全包覆织物模型的长方体,长方体高度为织物厚度,空气部分通过从长方体模型中减去与织物重叠空间,使用布尔运算完成,建立物理复合模型,如图 2b 所示。

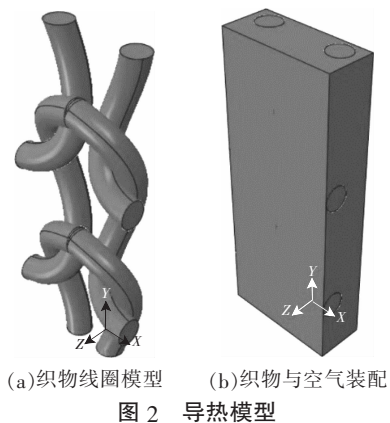


图 2 导热模型

2 针织物有限元模拟

2.1 假设条件

由纤维热各向异性性质可知,纱线被认为是横向各向同性材料,同时假定传热过程中织物材料热物理性质恒定。模型采用纬平针织物,厚度远小于纱线长度,因此可

直接认为它沿垂直于纤维轴向(横向)进行导热,模型为一维稳态传热^[10]。织物模型是间隙较小的纤维空气混合模型,对流仅发生于固体表面;日常使用情况下,织物系统和外界环境温差小,温度梯度小时,辐射传热可忽略不计,所以对流和辐射对服用情况下织物导热影响远小于热传导,本文只考虑织物内部的热传导。不同结构针织物导热性能主要和单位面积纤维含量有关,与纱线捻度无关,故线圈模型截面可看作理想圆形截面^[11]。

2.2 材料属性与网格划分

将在 Rhino 软件中建立的织物模型和空气模型以 Part 形式导入有限元软件 ABAQUS 并进行装配,创建包含空气的系统模型。同时,根据纺织材料学中纤维物理性质,设定模型材料物理参数。本文选定棉、羊毛和腈纶 3 种常用材料进行模拟,材料物理参数见表 2。

长度单位统一为 mm,指派 DC3D10 热传递单元类型,在不同网格密度下分别对线圈模型和空气模型进行网格划分。采用自由网格划分将线圈模型划分为 17 026 个单元,将空气模型划分为 10 457 个单元。网格模型如图 3 所示。

2.3 边界条件与计算

通过 ABAQUS/CAE 中协同模拟技术分析模型沿织物厚度方向的一维稳态传热。设定前提条件:针织服装贴身穿着,织物内表面贴近皮肤,皮肤温度 36 ℃,环境温度为人感觉舒适的 21 ℃,模拟分析静止空气下人体和外界环境对流换热达到动态平衡过程织物热传递情况。为确保模型换热达平衡,设置模拟时间 600 s。设定热传导分析步,分析步长 601。在 ABAQUS 中,模型预设边界状态为隔热,通过相互接触定义织物和空气以及

表 2 材料物理参数

纤维材料	体积质量/(g·cm ⁻³)	导热系数/[W·(m·℃) ⁻¹]	比热容/[J·(g·℃) ⁻¹]
静止空气	0.001 27	0.026	1.01
棉	0.920 00	0.071	1.21
羊毛	1.270 00	0.051	1.35
腈纶	1.140 00	0.052	1.51

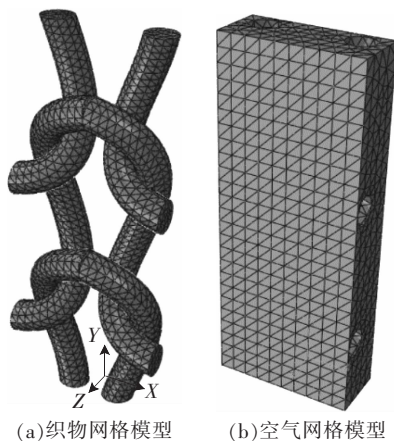


图 3 网格模型

线圈与线圈间热传导。选取导热模型内侧为人体皮肤面,设置温度 36 ℃,织物表面自由对流换热,对流换热系数为 5.000 W/(m²·℃)。为使计算结果收敛,在后续分析步设置变量时设置幅值。分别设置温度幅值和对流换热幅值,0 步长为 0,1 步长为 1,热传递过程自 1 步长开始至 601 步长。创建预定义场,模型初始温度 21 ℃,提交作业运算。

3 结果分析与验证

3.1 模拟结果分析

传热平衡后羊毛纤维织物系统温度场分布云图如图 4 所示。温度沿织物厚度方向均匀递减,织物与皮肤接触内表面温度最高,外表面温度最低,纱线交叠处及未与皮肤接触的线圈部分温度较低,证明纱线较空气具有更好的导热性能。同时,织物内外表面温差较大,原因是织物外表面和空气对流加速了热交换。织物系统热流量如图 5 所示,织物单位面积热流量明显大于空气单位面积热流量,热量会沿

阻力较小方向流动,织物内热流沿纱线路径流动且交叠处热流量较大,说明织物是系统中主要导热体,热传递主要沿纱线路径进行。

3.2 热阻计算

隔热性能是表征织物热舒适性的重要参数,在物理学中用热阻表示。织物的热阻 R (m²·℃/W) 表示内外表面单位面积温差和单位时间热流量之比^[12],根据傅立叶定律计算得式(1)、式(2)。

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

$$R = \frac{\Delta T}{Q/A} = \frac{\Delta T}{q} \quad (2)$$

式中: q 是热流密度, W·m⁻²; λ 是导热系数; $\frac{dT}{dx}$ 是沿热流方向温度梯度; Q 是总热量, J; A 是垂直热流方向表面积, m²; ΔT 是传热平衡时内外表面温差, ℃。织物热阻计算结果见表 3。

由计算结果可知,3 种织物在相同规格下,棉针织物热阻较腈纶和羊毛针织物低,保暖性能较差。在秋冬季针织衫材料选择时,考虑到御寒需求,对腈纶和羊毛的选用较多。腈纶和羊毛热阻相差不大,均具有良好保暖性,但羊毛针织衫价格较高,质量较大,且护理起来较麻烦,腈纶是理想的平价替代品,具有合成羊毛之称^[13]。

3.3 试验验证

为验证计算结果的有效性,按 GB/T 11048—2018《纺织品 生理舒适性 稳态条件下热阻和湿阻的测定(蒸发热板法)》,在标准条件下,使用 YG606 型织物保温性试验仪

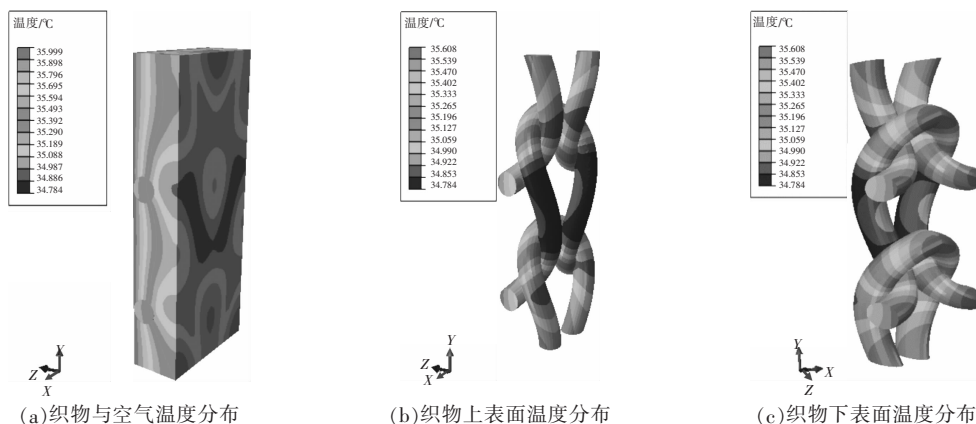


图 4 温度云图

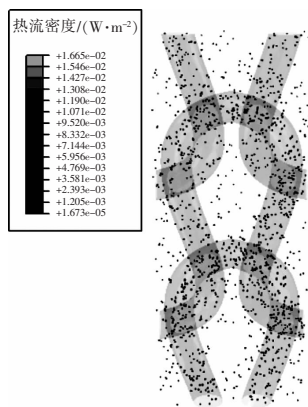


图 5 织物热流图

测试羊毛织物热阻为 $0.700\ 5 \times 10^{-2}\ \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$, 织物热阻模拟值为 $0.682\ 6 \times 10^{-2}\ \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$, 略低于计算值。一方面是由于模型没有模拟纱线表面丰富的毛羽, 毛羽挤压相互缠绕可增强织物保暖性, 增大与空气接触面积, 减少热量流失; 同时, 织物内部纤维间空隙存在空气填充, 空气层形成良好隔热, 这也是建模无法模拟的。但试验值与模拟值误差为 2.62%, 在可接受范围内, 证明仿真可行。

4 结束语

本文借助 3D 软件 Rhino 建立纬平针织物线圈模型, 使用有限元软件 ABAQUS, 结合实际边界条件和有限元法, 考虑针织物结构和传热现象, 基于能量守恒定律, 建立针织物导热模型, 预测针织物纱线-空气系统稳态导热性能, 计算

表 3 有限元模拟结果

材料	温差/ $^\circ\text{C}$	热流密度/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	模拟热阻/ $(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1})$
棉	0.694 3	$1.427\ 5 \times 10^2$	$0.486\ 4 \times 10^2$
羊毛	0.823 4	$1.206\ 2 \times 10^2$	$0.682\ 6 \times 10^2$
腈纶	0.821 9	$1.229\ 1 \times 10^2$	$0.668\ 7 \times 10^2$

不同材料针织物穿着情况下的热阻, 分析传热过程针织物系统温度分布和热通量分布。将计算热阻值和试验热阻值对比, 误差在 2.70% 以下, 证明模型有效, 同时为秋冬季针织衫的原料选择提供依据。

参考文献

[1] 师琅. 织物热湿传递测评及模型研究进展[J]. 针织工业, 2020(5): 82-87.
 [2] SIDDQUI M O R, SUN D. Conjugate heat transfer analysis of knitted fabric[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2017, 129(1): 209-219.
 [3] 孙玉钗, 冯勋伟, 刘超颖. 纺织品热传递有限元分析[J]. 东华大学学报: 自然科学版, 2006(2): 50-53.
 [4] 吴佳佳, 唐虹. 应用 ABAQUS 的织物热传递有限元分析[J]. 纺织学报, 2016, 37(9): 37-41.
 [5] FAN J, WANG L L, CHENG Q, et al. Thermal analysis of biomimic woven fabric based on finite element method[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2015, 121(2): 737-742.
 [6] 李瑛慧, 谢春萍, 刘新金, 等. 仿真丝织物与真丝织物的热传递有限元仿真[J]. 丝绸, 2017, 54(12): 7-11.

[7] ZHENG Z, ZHANG N, ZHAO X. Simulation of heat transfer through woven fabrics based on the fabric geometry model[J]. Thermal Science, 2018(6): 2815-2825.
 [8] 耿长军, 刘让同, 胡泽栋, 等. 机织物热传递有限元仿真及其分类模型[J]. 棉纺织技术, 2019, 47(8): 22-25.
 [9] 代文杰, 邱华, 杨恩惠, 等. 基于 ANSYS CFX 的织物透气性数值计算[J]. 丝绸, 2018, 55(9): 51-56.
 [10] 张鹤誉, 郑振荣, 赵晓明, 等. 玻璃纤维交织织物的热传递数值模拟[J]. 纺织学报, 2015, 36(3): 28-31, 42.
 [11] OGGLAKCIOGLU A M. Thermal comfort perties of some knitted structures[J]. Fibres and Textiles in Eastern Europe, 2007(64-65): 5-10.
 [12] MATUSIAK M A. Modelling the thermal resistance of woven fabrics[J]. Journal of the Textile Institute, 2013(4): 426-437.
 [13] 张思雨, 赵立环, 于洁, 等. 基于石墨烯材料及其复合物的纺织品抗菌整理研究[J]. 上海纺织科技, 2020, 48(4): 5-9.

收稿日期 2021 年 2 月 10 日