

DOI: 10.19333/j.mfkj.2017090270805

# 非稳态条件下织物热传递模拟分析

陈扬<sup>1</sup> 杨允出<sup>1,2</sup> 刘莹<sup>1</sup>

(1. 浙江理工大学 国际教育学院, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江理工大学 浙江省服装工程技术研究中心, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 为了分析热量通过织物时的热传递情况, 采用 ANSYS 建立皮肤、空气层与织物的有限元模型, 模拟分析了不同织物、不同空气层厚度及不同对流条件下模型内部和织物外表面的瞬态温度分布情况。同时探索了空气等效导热系数的增大对热量传递的影响。结果表明: 空气层的厚度对织物热传递有影响, 随着空气层厚度的增加, 热传递达到平衡时的时间逐渐增长, 织物外表面的温度逐渐降低, 且下降的梯度逐渐减小; 热对流的存在缩短了热量传递达到平衡时的时间, 且对流换热系数越大, 织物表面温度越低; 增大空气的等效导热系数, 热量传递的距离更远。为了验证模拟的正确性, 在人工气候室进行了恒温板实验, 结果发现模拟结果和实验数据相关性良好。

**关键词:** 织物; 空气层; 热传递; 有限元; 温度分布

中图分类号: TS 101.1 文献标志码: A

## Simulation analysis of heat transfer of fabrics in unsteady-state conditions

CHEN Yang<sup>1</sup>, YANG Yunchu<sup>1,2</sup>, LIU Ying<sup>1</sup>

(1. International Education College, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;  
2. Zhejiang Provincial Research Center of Clothing Engineering Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

**Abstract:** In order to analyze the heat transfer mechanism of heat through the fabric, a finite element model combined with skin, air layer and fabrics was established by ANSYS software. The transient temperature distribution in the inner of model and surface of the fabric were simulated and analyzed in different fabrics, air layer thickness and air convection. Meanwhile, the effective thermal conductivity of air was introduced and its influence on the heat transfer was also analyzed. The results showed that the air layer thickness had an influence on heat transfer of fabric. With the increase of air layer thickness, heat transfer balance time increased gradually, and the surface temperature of fabric decreased gradually but the gradient became smaller. The heat convection shortens the time of heat balance, and the surface temperature of the fabric decreased with increase of heat transfer coefficient. With the increase of the value of the effective thermal conductivity of air, the distance of heat transfer was farther. In order to prove the validity of the simulation, the constant temperature plate experiment was carried out in the artificial climate chamber. The results showed that the correlation between the simulation results and experimental data was good.

**Keywords:** fabric; air layer; heat transfer; finite element; temperature distribution

织物热传递直接影响人体的舒适性, 关于织物热传递方面的研究已引起越来越多的学者关

收稿日期: 2017-09-26

基金项目: 浙江省自然科学基金(Y17E060034); 浙江理工大学教育教学改革研究项目(jgy11403)

第一作者简介: 陈扬, 硕士生, 主要研究方向为服装舒适性与功能。通信作者: 杨允出, E-mail: gary0577@zstu.edu.cn。

注<sup>[1-2]</sup>, 许多文献对织物的热传递性能进行实验分析与建模仿真。庞方丽等<sup>[3]</sup>研究认为环境温度、纤维的热传导系数对织物的热传递有显著影响。邹文静<sup>[4]</sup>将3种不同的织物两两放置靠近热源, 来研究人体多层服装时的热传递现象, 结果表明导热系数大的织物靠近热源时, 保温效果较好。在实验过程中, 要描述热量在织物内的瞬态传递过程很困难, 而有限元模拟方法适合处理这类问题。孙玉钗等<sup>[5-7]</sup>

运用有限元软件 MARC 模拟了棉织物的热传递过程,描述了热量在传递过程中棉织物横截面上任意位置、任意时刻的温度分布情况。WAN 等<sup>[8]</sup>建立了纤维集合体传热的一系列模型,并用有限元体积法对模型进行计算。范坚等<sup>[9]</sup>建立织物的二维模型,模拟了热量通过人体皮肤、织物向外散热过程中的温度的分布,并比较了平纹织物与斜纹织物的传热情况,但是忽略了对流传热对热传递的影响。

本文在织物热传递理论的基础上,用有限元软件 ANSYS 建立织物与空气层的组合模型,并从织物种类、空气层厚度、对流条件 3 个方面对不同的模型进行瞬态传热模拟,同时探索了空气等效导热系数的增大对热量传递的影响。

## 1 理论分析

热量的干热传递有 3 种基本方式:热传导、热对流与热辐射。热量在织物中传递时,是通过纤维与纤维之间的空气传导。由于热量在传递时沿织物厚度方向的温度变化远大于另外 2 个方向的温度变化,因此热量在以人体皮肤—空气层—织物—外部环境组成的系统中传递时可以简化成一维的热传递。人体皮肤和织物的内层、外层织物和环境之间的温差较小,因此忽略辐射,本文主要考虑织物内热传导和织物与空气间热对流 2 种传递方式。

### 1.1 热传导

导热是物体各部分之间存在温度差而发生的热量传递现象。其遵循能量守恒定律与傅里叶定律<sup>[10]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

式中:  $\lambda$  为导热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;  $T$  为温度,  $^{\circ}C$ ;  $t$  为时间  $s$ ;  $\rho$  为质量密度  $kg/m^3$ ;  $c$  为比热  $J/(kg \cdot ^{\circ}C)$ 。

多层平壁的一维热传递过程如图 1 所示。当平壁两侧的温度均匀时,第  $i$  层平壁的热流量传导遵循傅里叶定律:

$$Q_i = \lambda_i S \frac{T_i - T_{i+1}}{b_i} = \frac{\Delta T_i}{R_i} \quad (2)$$

扩展到多层平面,则有

$$Q = (T_1 - T_{n+1}) / \sum_{i=1}^n R_n \quad (3)$$

式中:  $Q$  为热流量,  $W$ ;  $\lambda_i$  为第  $n$  层材料的导热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;  $S$  为材料表面积,  $m^2$ ;  $b_i$  为第  $i$  层材料的厚度,  $m$ ;  $T_i$ 、 $T_{i+1}$  和  $T_{n+1}$  分别为第  $i$  层材料两侧的温度和第  $n$  层材料外侧温度,  $K$ ;  $R_i$  和  $R_n$  分别为第  $i$  层和第  $n$  层材料的导热热阻,  $K/W$ 。

### 1.2 热对流

对流换热是流体和固体壁面接触时,二者温度

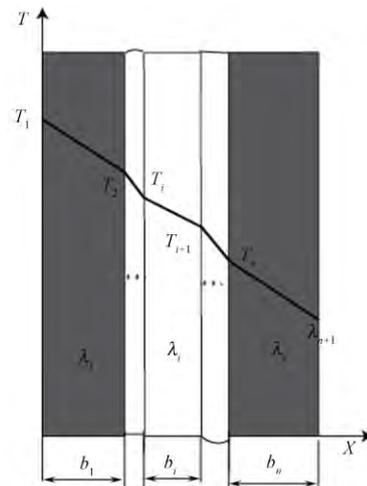


图1 多层平壁的热传导

不同相互间发生的热传递现象。在皮肤、空气、织物与环境组成的系统中,织物的外表面会存在对流换热,可以用牛顿冷却公式来表示,即

$$q^* = h(T_s - T_b) \quad (4)$$

式中:  $q^*$  为热流密度,  $W/m^2$ ;  $h$  为对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $T_s$  为固体表面温度,  $^{\circ}C$ ;  $T_b$  周围流体温度,  $^{\circ}C$ 。

## 2 数值模拟

### 2.1 几何模型

由于纤维和空气之间结构配置的复杂性,在模拟分析时将织物作为匀质的整体。在实际穿着时,织物没有和人体表面紧密接触,皮肤和织物之间有一定的空气,假定空气层为 1~5 mm。由空气层及织物组成的简化模型如图 2 所示。



图2 简化模型

选取的单元类型为 PLANE55,含有 4 个节点,每 1 个节点仅有 1 个温度自由度。该单元适用于二维稳态或瞬态的热分析。建立各织物和不同厚度空气层的组合模型后,采用映射网格划分,网格单元尺寸设置为 0.000 1 m,图 3 为划分后的部分网格模型,共有 1 400 个单元,1 515 个节点。

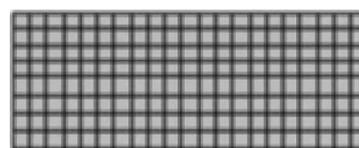


图3 部分网格模型

## 2.2 材料属性

模拟分析中用到的材料有棉织物、羊毛呢织物、摇粒绒织物及不同厚度的空气层,涉及到的相关属性参数如表1所示。

表1 材料参数

材料	厚度/ mm	导热系数/ ( $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$ )	比热容/ ( $J \cdot (kg \cdot ^\circ C)^{-1}$ )	密度/ ( $kg \cdot m^{-3}$ )
棉织物	0.38	0.071	1 220	364.420
羊毛呢	1.21	0.041	1 450	277.690
摇粒绒	1.20	0.028	1 340	159.170
空气层	1~5	0.026	1 010	1.205

## 2.3 施加载荷与边界条件

几何模型网格划分之后,对其施加各种载荷与边界条件。在瞬态热分析中,将人体的皮肤温度作为温度边界条件,施加在和皮肤相接触的线上,皮肤温度为 $33.5^\circ C$ 。假定织物的边界是绝缘体,即和环境没有热交换,仅上表面与空气存在对流,对其施加强对流载荷。本文模拟了不同对流情况下热传递情况,在分析过程中设定3种情况:没有对流的理想情况、自然对流与强迫对流。自然对流时对流换热系数设定为 $10 W / (m^2 \cdot K)$ ,强迫对流时对流换热系数设定为 $20 W / (m^2 \cdot K)$ <sup>[10]</sup>。瞬态分析时需定义初始温度,设定环境温度 $20^\circ C$ 为初始温度。

## 2.4 选择加载历程

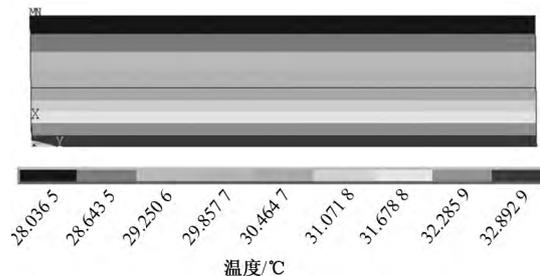
因为要获得模型截面上任何一点在任意时刻的温度,所以选用瞬态热分析。为了便于对比分析,模拟选用一样的时间总历程与步长。时间总历程为 $180 s$ ,步长为 $1 s$ ,最大步长为 $2 s$ 。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同织物的热传递模拟

空气层厚度为 $1 mm$ ,对3种不同的织物模型进行瞬态热分析。对流换热系数为 $10 W / (m^2 \cdot K)$ ,施加载荷与求解,得到空气层及织物内节点在任意时刻的温度分布。其中羊毛呢织物模型截面温度分布云图如图4所示,羊毛呢织物模型中不同节点温度随时间变化曲线如图5所示。

由图5可以看出,热量经由人体皮肤通过空气层、织物向外传递过程中横截面上各节点在任意时刻的温度变化情况,其中节点5及节点9为人体皮肤和织物之间的空气层横截面的温度分布,分别距离人体皮肤 $0.000 3$ 、 $0.000 7 m$ 。节点2为空气层与织物内表面相交面的温度分布。节点1113、1117、1121为织物的横截面内温度分布,分别距离织物外表面 $0.001 2$ 、 $0.000 8$ 、 $0.000 4 m$ 。



注:空气层厚度为 $1 mm$ 。

图4 羊毛呢织物模型截面温度分布云图

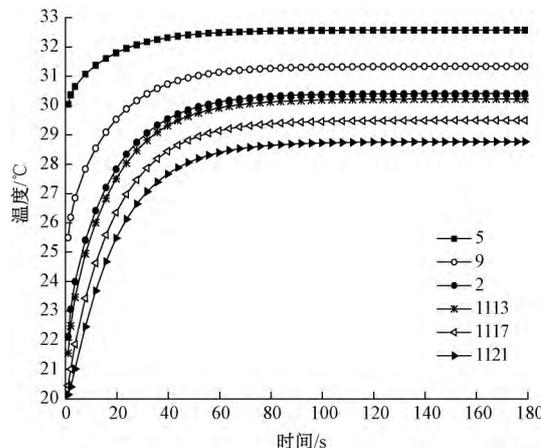


图5 模型中不同节点温度随时间变化曲线图

图6为织物外表面温度随时间的变化曲线。由图可知,纯棉织物、羊毛呢织物、摇粒绒织物外表面温度分别为 $29.415$ 、 $28.036$ 、 $27.445^\circ C$ ,即导热系数大的织物表面温度较高。

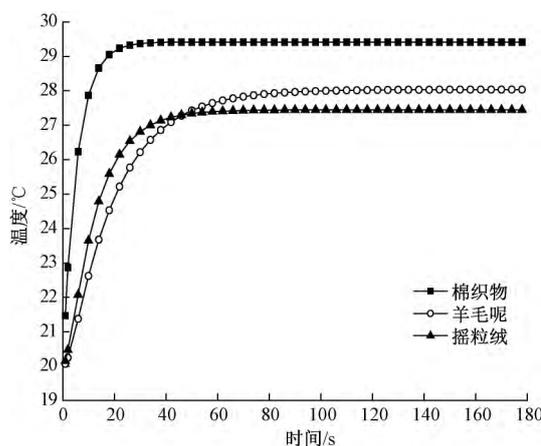
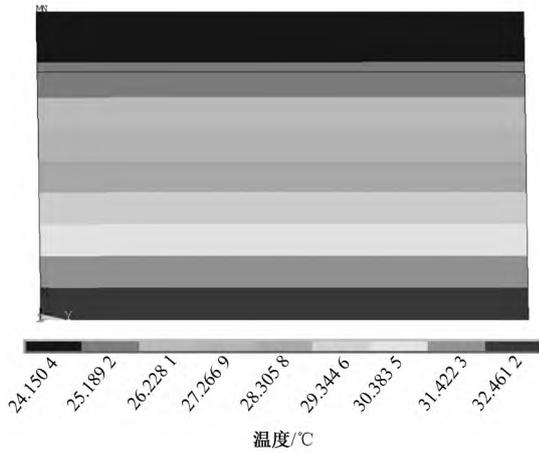


图6 织物外表面温度随时间变化曲线图

### 3.2 不同空气层的热传递模拟

为了分析空气层厚度不同时热量的传递情况,在模拟分析中,采用羊毛呢织物进行实验,织物厚度为 $1.21 mm$ ,将空气层以 $1 mm$ 为梯度,逐渐增加至 $5 mm$ ,对流换热系数为 $10 W / (m^2 \cdot K)$ 。求解得到的空气层厚度为 $5 mm$ 时羊毛呢织物外表面温度分布云图如图7所示。



注:空气层厚度为5 mm。

图7 羊毛呢织物模型截面温度分布云图

通过图4、7可以看出,空气层及织物截面上任意点在180 s时的温度。空气层厚度不同时,羊毛呢织物外表面温度随时间变化曲线如图8所示。通过对比可知,随着空气层厚度的增加,热量传递达到平衡时的时间逐渐增长。达到平衡时,随着空气层厚度的增加,各模型织物外表面的温度逐渐下降,分别为28.036、26.531、25.489、24.727、24.146 °C。下降的梯度越来越小,空气层厚度从1 mm增加到2 mm时,温度下降了1.505 °C,而从4 mm增加到5 mm时的温度差为0.581 °C。

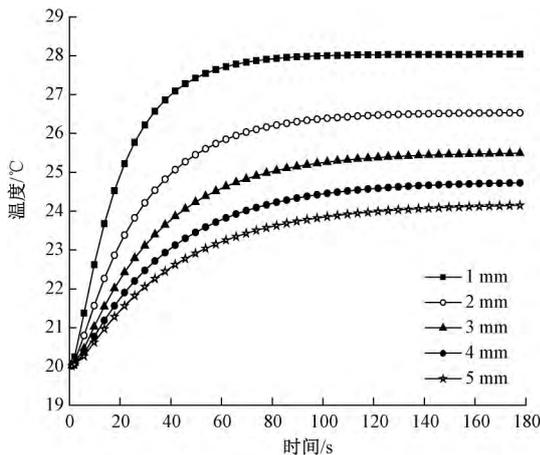


图8 空气层厚度不同时织物表面温度随时间变化曲线

### 3.3 不同对流条件的热传递模拟

为了分析不同对流情况下热量的传递情况,在模拟分析中,采用羊毛呢织物进行实验,织物厚度为1.21 mm,空气层厚度为1 mm。在分析过程中设定了3种情况:没有对流发生时的理想情况、自然对流与强迫对流。织物外表面的温度随时间变化曲线如图9所示。

图9对比了羊毛呢织物在不同对流情况下的表面温度分布。从图得知,对流缩短了热量传递达到

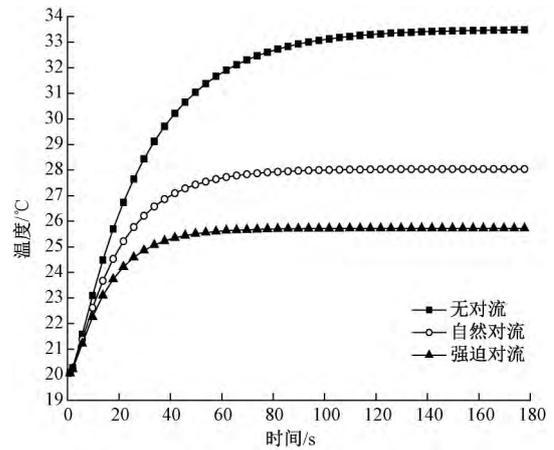


图9 不同对流条件下织物表面温度随时间变化曲线图

平衡时的时间,且对流换热系数越大,达到平衡时的时间越短。达到平衡时,无对流、自然对流与强迫对流时羊毛呢织物表面的温度分别为33.475、28.036、25.721 °C。说明对流加快了热量传递速度,且对流传热系数越大,热量传递得越快。

### 3.4 空气等效导热系数对热传递的影响

人体与服装之间存在空气,衣下空气层内不可能完全静止,导热、对流可能同时存在。假设增大空气的等效导热系数来补偿空气层内的对流传热。

采用厚度为1.21 mm羊毛呢织物进行模拟。空气层厚度为5 mm,导热系数 $\lambda$ 为0.026 W/(m·K),将空气导热系数 $\lambda$ 乘上修正系数 $n$ ,得到空气的等效导热系数 $\lambda_a$ ,即 $\lambda_a = n\lambda$ 。这里取 $n = 3, 5, 7, 9$ 来进行模拟,以便探索空气与织物组合体的温度分布情况。 $n = 9$ ,即 $\lambda_a = 0.234$  W/(m·K)时,模型外表面温度分布如图10所示。空气层等效导热系数不同时,织物外表面温度随时间变化曲线见图11。

由图7、10可知,随着空气层等效导热系数的增大,热量传递的距离逐渐变远,织物内温度梯度更加明显。图11中,热量传递达到平衡时,织物表面温度分别为24.146、26.968、28.036、28.599、28.947 °C。

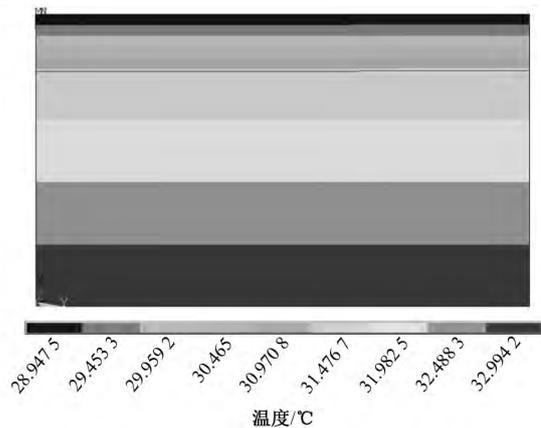


图10  $n = 9$ 时羊毛呢织物模型截面温度分布云图

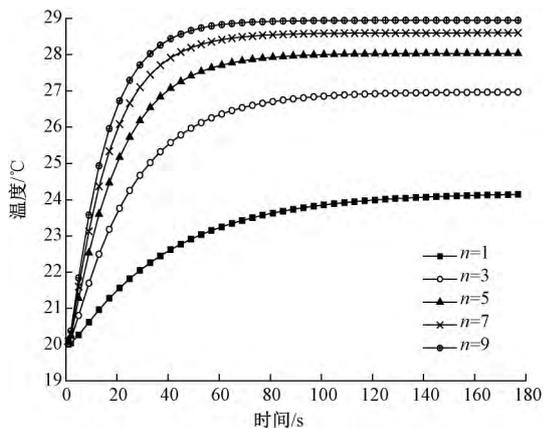


图 11 空气层等效导热系数不同时织物表面温度随时间变化曲线

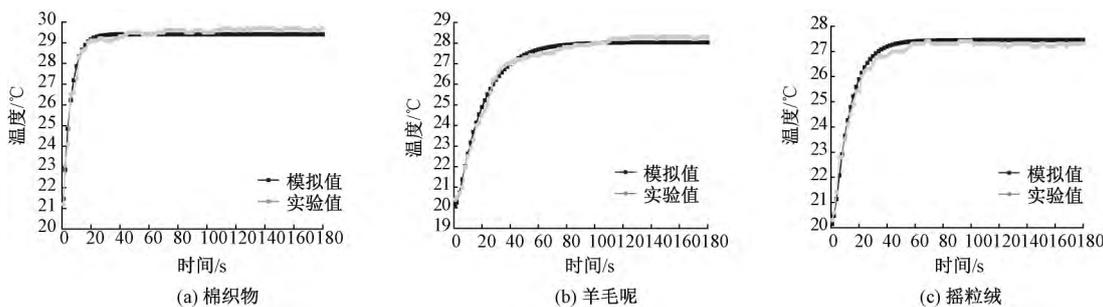


图 12 不同织物表面温度实验结果与模拟结果对比

由图 12 可知, ANSYA 模拟分析结果和实验数据的吻合度较好。实验过程中, 加热台的加热过程不连续, 温度传感器的灵敏度及室内环境温度调节会产生误差, 导致实验数据上下波动。对对流换热系数的确定可能存在误差, 它和织物表面的粗糙程度、空气流速等因素相关, 因此理论数据和实验数据存在一定偏差。

### 5 结论

①通过 ANSYS 建立了皮肤、空气层和织物的有限元模型, 可以得到模型横截面上任意点、任何时刻的瞬态温度。

②外界环境条件相同时, 随着空气层厚度的增加, 热传递达到平衡时的时间逐渐增长; 在相同时刻, 织物外表面的温度逐渐降低, 下降的梯度逐渐减小。

③对流的存在缩短了热量传递达到平衡时的时间, 且对流换热系数越大, 织物表面温度越低。

④若考虑空气层内复合传热时, 可以通过修正空气的等效导热系数实现。增大空气的等效导热系数, 热量传递距离有所增大。

#### 参考文献:

[1] MOHAMMADI M, BANKS LEE P, GHADIMI P.

随着  $n$  值的增大, 织物外表面温度逐渐上升, 且上升的幅度逐渐变小。修正系数  $n$  从 1 增加到 3 时, 温度升高了  $2.822\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 而从 7 增大到 9 时的温度差为  $0.348\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

### 4 实验验证

热传递实验是在人工气候室中进行, 室内温度设定为  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 自然对流。实验所用的 3 种织物见表 1。用恒温加热台表面的温度来代替人体的皮肤温度, 设为  $33.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。将厚度为  $1\text{ mm}$  的亚克力板的中间挖掉  $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$  的方形来模拟空气层的厚度。用 PT100 温度传感器读取织物表面的温度。加热台、空气层及织物的放置如图 2 所示。图 12 示出 3 种织物表面实验测得的温度与模拟温度的对比图。

Determining effective thermal conductivity of multilayered nonwoven fabrics [J]. Textile Research Journal 2003, 73(9): 802-808.

[2] 张鹤誉, 赵晓明, 郑振荣. 织物热传递的数值模拟研究进展[J]. 山东纺织科技, 2014, 55(1): 50-53.

[3] 庞方丽, 刘星, 王瑞. 织物热传递性能的影响因素[J]. 轻纺工业与技术, 2013(2): 21-24.

[4] 邹文静. 非稳态条件下纺织品热传递性能[D]. 上海: 东华大学, 2008.

[5] 孙玉钗, 冯勋伟, 程中浩. 空气层及织物层数对通过纺织品热量损失的影响[J]. 纺织学报, 2005, 26(2): 74-76.

[6] 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, 32(2): 50-53.

[7] SAN Yuchai, CHEN Xiaoguang, CHENG Zhonghao, et al. Study of heat transfer through layers of textiles using finite element method [J]. International Journal of Clothing Science and Technology 2010, 22(2): 161-173.

[8] WAN Xianfu, FAN Jintu. Heat transfer through fibrous assemblies incorporating reflective interlayers [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer 2012, 55(25): 8032-8037.

[9] 范坚, 倪波. 织物单元结构传热的数值模拟研究[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2002, 28(4): 5-10.

[10] 秦臻. 传热学理论及应用研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016: 33-36, 109.