

防寒服保温性与材料组合方式

王 蒙¹, 陈少伟², 王府梅^{*1,3}

(1. 东华大学 纺织学院, 上海 201620; 2. 艾莱依时尚股份有限公司, 浙江 丽水 323000; 3. 东华大学 纺织面料技术教育部重点实验室, 上海 201620)

摘 要:通过模拟真实使用场景,选取防寒服常用的4种保温材料分别与4种不同面料组合,利用织物凉感测试仪在3种风速、3种环境温度下测试组合纺织品的热阻,研究保温材料种类、面料性能、环境风速和温度对组合纺织品热阻的影响。结果表明:防寒服用组合纺织品热阻与保温层厚度、纤维堆砌结构相关,加入絮状材料后保温效果会大幅度提升;其热阻与表层面料的挡风性关系密切,对于纤维间孔隙比较小的木棉絮料和大衣呢,热阻随外层面料变化的幅度不大,而对于纤维间孔隙比较大的羽绒材料,保温效果高度依赖于外层面料的挡风性;环境条件对防寒服用组合纺织品热阻值影响很大,环境风速越大、环境温度越高,所测热阻值越小。

关键词:保温材料;热阻;保温性;风速;温度

中图分类号:TS 941.15;TS 701.923.2 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-1928(2020)03-0189-06

Insulation Performance of Cold Protective Clothing Combined with Different Materials

WANG Meng¹, CHEN Shaowei², WANG Fumei^{*1,3}

(1. College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Eral Fashion Co., Ltd., Lishui 323000, China; 3. Key Laboratory of Textile Science and Technology, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: By simulating the real use scenarios, four different thermal insulation materials were selected to be combined with four different fabrics, respectively. The thermal resistance of the combined materials were tested by flat thermal fluidity tester under three wind speeds and three temperatures. The influence of thermal insulation materials, fabric properties, wind speeds and temperatures of the thermal resistance of composite textiles were investigated. The results show that the thermal resistance of composite textiles is highly related to the thickness of insulation layer and the fiber stack structure, and the thermal insulation effect will be greatly improved after adding the flocculent material. The thermal resistance of composite textiles is closely related to the wind resistance of the surface fabrics. For the kapok materials and overcoats with relatively small fiber pores, the thermal resistance changes very little with the outer fabric, while for feather materials with relatively large fiber pores, the insulation effect is highly dependent on the windshield of the outer fabric. The environment conditions have a great influence on the test value of the thermal resistance of the materials, when the wind speed and the temperatures are higher, the thermal resistance value is lower.

Key words: thermal insulation material, thermal resistance, warmth retention property, wind speed, temperature

寒冷条件下,环境与人体之间的巨大温差以及大风气候条件会加速人体热量散失,此时防寒服成

为维持身体热平衡的重要屏障。防寒服主要分为两类:主动产热式防寒服和被动隔热式防寒服^[1],

收稿日期:2020-03-02; 修订日期:2020-04-30。

基金项目:国家自然科学基金项目(51673036)。

作者简介:王 蒙(1995—),女,硕士研究生。

*通信作者:王府梅(1958—),女,教授,博士生导师。主要研究方向为纺织面料的服用性能、功能性纺织品及纺织CAD技术。Email:wfumei@dhu.edu.cn

因目前市面上主动产热式防寒服存在携带电池、洗涤及安全等问题^[2],故大多数防寒服仍为被动式。防寒服的保温性能受材料、环境(风速^[3-4]、相对湿度^[5])和皮肤温度^[6]、衣下空气层厚度、层数^[7]、面料的透气性^[8-9]等多因素的综合影响。目前,企业普遍采用人体感官经验进行防寒服保温性的评判,成本高、耗时长,并且依赖人的主观能动,缺少客观数据的定量支撑。

文中依据防寒服的原材料组合方式与结构,在模拟真实使用环境下,用方便快捷方式,测试防寒服常用保温材料(木棉絮状材料、羽绒、粗纺大衣

呢)与面料组合试样的保温性,探讨环境温度、风速对其影响,寻求提高面料、里料热阻的最佳组合方式,为企业选材和防寒服设计提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 试样 根据冬季防寒服原材料使用情况,选取 4 种常见保温材料分别与 4 种常用面料组合,试样规格见表 1,保温材料的结构参数见表 2,保温材料横断面如图 1 所示。

表 1 试样规格

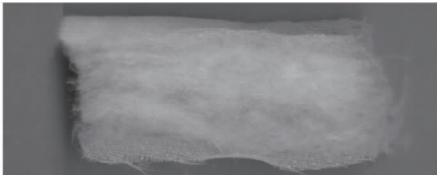
Tab.1 Specification of samples

试 样 编 号	品 名	制造方法	原材料	混纺 质量比	厚度/mm	面密度/ (g/m ²)	透气率/ (mm/s)
面料	a	平纹	机织	涤纶长丝	100:0	0.17	27.9
	b	斜纹	机织	PET 长丝	100:0	0.34	193.6
	c	斜纹	机织	涤/棉混纺	45:55	0.23	129.4
	d	平纹	机织	涤/棉混纺	50:50	0.24	111.2
保温 材料	e	大衣呢	毛粗纺机织	羊毛/锦纶	90:10	2.46	278.0
	f	木棉絮料	梳理制网,针刺固网	木棉/棉	50:50	5.50	123.8
	g	羽绒絮 A	纱布包羽绒低熔点涤纶	羽绒/低熔点涤纶	90:10	7.20	80.9
	h	羽绒絮 B	纱布包羽绒低熔点涤纶	羽绒/低熔点涤纶	90:10	10.10	141.0

表 2 保温材料结构参数

Tab.2 Structural parameters of thermal insulation material

保温材料	孔隙率/%	蓬松度/(cm ³ /g)
大衣呢	91.3	8.85
木棉絮料	97.6	44.40
羽绒絮 A	99.0	89.00
羽绒絮 B	98.8	71.60



(d)羽绒絮B

图 1 4 种保温材料的横断面照片

Fig.1 Cross-sectional photos of four thermal insulation materials

1.1.2 仪器 HFB-1 型织物凉感测试仪,江苏斯利浦睡眠产业科技有限公司制造;吹风装置,自行搭建。

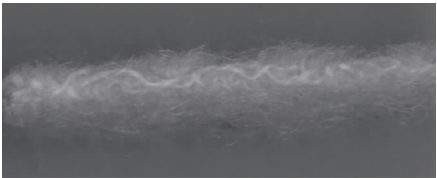
1.2 方法

热阻为试样两面温差与垂直通过试样单位面积的热流量之比,即

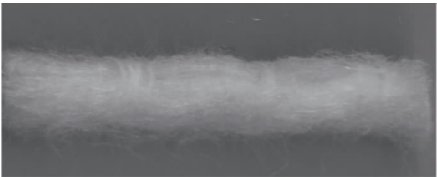
$$R = \frac{(T_s - T_a) \times S}{H} \tag{1}$$

式中: R 为总热阻^[10]($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$); T_s 为传感器表面的平均温度($^{\circ}\text{C}$); T_a 为环境的平均温度($^{\circ}\text{C}$); S 为传感器总面积(m^2); H 为稳态传热中传感器输出的平均功率(W)。

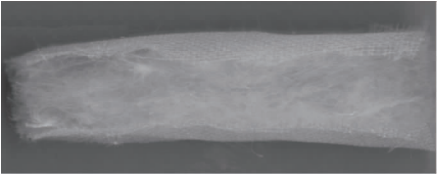
根据 GB/T 11048—2018《纺织品 生理舒适性 稳态条件下热阻和湿阻的测定》^[11],采用织物凉感测试仪测试防寒服用组合试样的热阻,以 3 次测算



(a)大衣呢



(b)木棉絮



(c)羽绒絮A

的热阻平均值作为该组合的测试结果。测试条件:在人工气候仓内,温度分别设定为 (20.0 ± 0.5) 、 (10.0 ± 0.5) 和 (0.0 ± 0.5) ℃,相对湿度为 $(65 \pm 3.0)\%$,风速分别为3.0、1.5 m/s 和 <0.1 m/s。织物凉感测试仪的传感器面积为5 cm × 10 cm,模拟体表温度将传感器平均温度设定在33℃^[12]。

2 结果与分析

热量传递方式包括热传导、热对流、热辐射。多孔材料在温度小于300℃时可以忽略辐射散热^[13],人体皮肤和防寒服用组合纺织品之间的温差较小,因此文中主要考虑热传导和热对流对其保温性的影响。自然对流环境(风速 <0.1 m/s)下的热阻通常被称作静态热阻,有风状态下的热阻称为动态热阻。

2.1 不同防寒服的静态热阻比较

图2为防寒服常用的4种保温材料分别与4种不同面料组合,在气候仓环境温度10℃、相对湿度65%、自然对流环境下测试的热阻。

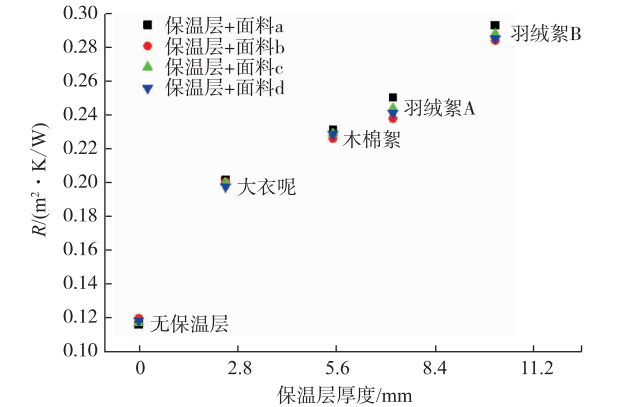


图2 防寒服用组合纺织品的静态热阻与保温层厚度的关系

Fig. 2 Relationship between static thermal resistance and thermal insulation thickness of composite textiles for cold protective clothing

由图2可以看出,防寒服用组合纺织品的保温性与保温层厚度呈正相关;无保温层时面料的热阻明显下降,说明保温层对热阻的贡献远大于表层面料,即絮状材料或缩绒拉毛处理过的大衣呢在保温方面占主导作用。另外,防寒服用组合纺织品的热阻随外层面料的不同而变化,外层面料的差异主要体现在透气性或挡风性;防寒服用组合纺织品热阻的变化幅度与保温层种类相关,主要是受保温层的纤维种类和纺织结构两方面的影响。

结合表2和图1可以看出,大衣呢的孔隙率低,

有一层纤维紧密排列的小孔隙纱线;木棉絮的孔隙率高、孔隙小且均匀;羽绒絮的孔隙率高、但孔隙不均匀,并且存在大孔隙。对于纤维间孔隙比较小的木棉絮料和大衣呢,防寒服用组合纺织品的热阻随外层面料变化的幅度不大,说明自身结构阻挡对流散热的能力强,对外层面料的挡风性依赖程度不高;而对于存在大孔隙的羽绒材料,保温效果与外层面料的挡风性相关程度高。

为剔除试样规格影响,将图2中防寒服用组合纺织品的热阻换算成保温层单位面密度热阻(因为表层面料的热阻值较小,故忽略,下同),具体结果见表3。

表3 保温层单位面密度热阻
Tab. 3 Thermal resistance per unit area of thermal insulation material
单位: $(\text{dm}^4 \cdot \text{K})/(\text{W} \cdot \text{g})$

面 料	保温材料			
	大衣呢	木棉絮料	羽绒絮 A	羽绒絮 B
a	7.27	18.70	31.00	20.81
b	7.22	18.29	29.45	20.17
c	7.21	18.54	30.20	20.45
d	7.13	18.50	29.84	20.24

由表3可以看出,单位面密度热阻从大到小依次为羽绒絮A、羽绒絮B、木棉絮、大衣呢;羽绒絮A与各面料组合的热阻都是最大的,同时表2显示,4种保温材料中羽绒絮A的蓬松度和孔隙率最高,说明蓬松度和孔隙率是影响保温性的两个重要因素。与其他面料相比,面料a与各种保温层组合时热阻都是最大的,而面料a的特性是透气率低、挡风性好。因此,影响防寒服用组合纺织品热阻的关键因素是面料的透气率或挡风性,而面料自身热阻高低对其影响甚微。

2.2 不同防寒服的动态热阻比较

将防寒服常用的4种保温材料分别与4种不同表层面料组合,在环境温度分别为0、10℃,相对湿度均为65%的条件下以1.5、3 m/s两种不同风速分别进行热阻测试,具体结果如图3所示。

由图3可以看出,在同一温度下,防寒服用组合纺织品的热阻均随着风速的增大而减小;在同一风速下,其热阻均随环境温度降低而增大。从图3还可以看出,在风速从1.5 m/s增至3 m/s的条件下,0℃时防寒服用组合纺织品的热阻变化幅度大于10℃时的,说明在低温条件下风速对防寒服保温性能影响更大。

进一步分析不同条件下表层面料和保温材料组合的热阻变化,发现当同一保温材料与不同面料搭配时,保温材料与面料a组合的热阻明显大于与

面料 d 组合的热阻,说明表层面料透气性对动态保温性有很大影响。这是因为面料的透气率越高,表面对流散热越多。

图 3 中,在风速 3 m/s、温度分别为 0 ,10 ℃ 的条件下,绝大多数情况 4 种保温材料与面料 b 组合

的热阻都是大于与面料 c 组合的热阻;而在1.5 m/s 风速下,温度仍为 0 ,10 ℃ 时 4 种保温材料与面料 c 组合的热阻都大于与面料 b 组合的热阻,说明风速大时面料 b 适合做表层面料,而风速小时面料 c 更宜做表层面料。

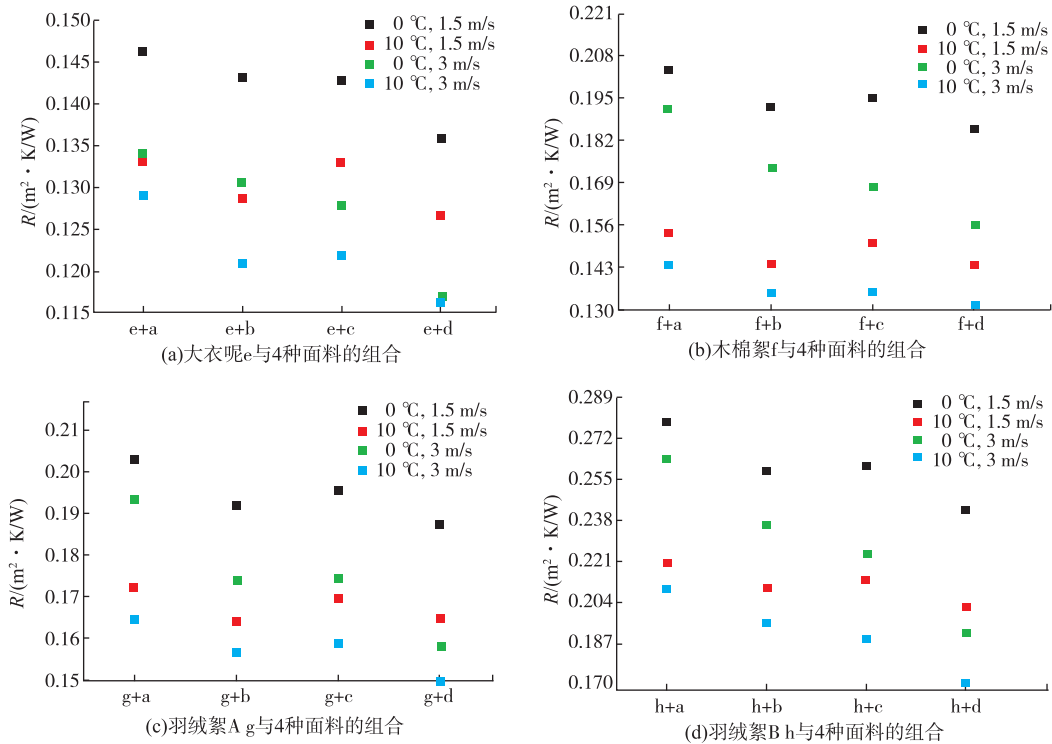


图 3 防寒服用组合纺织品的动态热阻随环境风速、温度的变化

Fig.3 Changes of dynamic thermal resistance of composite textiles for cold protective clothing towards environmental wind speed and temperature

为剔除试样规格影响,将环境温度为 0 ℃、风速 3 m/s 条件下防寒服用组合纺织品的热阻换算为保温层单位面密度热阻,具体结果见表 4。

表 4 保温层单位面密度热阻

Tab.4 Thermal resistance per unit area of thermal insulation material

面 料	保温材料			
	大衣呢	木棉絮料	羽绒絮 A	羽绒絮 B
a	4. 82	15. 46	23. 94	18. 70
b	4. 70	14. 02	21. 57	16. 77
c	4. 59	13. 53	21. 61	15. 91
d	4. 20	12. 60	19. 58	13. 63

由表 4 可以看出,4 种保温层热阻从大到小依次为羽绒絮 A、羽绒絮 B、木棉絮、大衣呢,与表 3 的规律类似。但是,与表 3 比较可以发现,表 4 中各保温材料的热阻值普遍降低,说明在真实有风的使用环境中防寒服保温性低于实验室自然对流时测试的热阻。另外,表 4 中木棉絮料的热阻与羽绒絮 B

相差不大,说明木棉絮料具有与羽绒相近的轻而暖的特性,而木棉售价不到羽绒的 5%,这体现出木棉的重要应用价值。

2.3 环境温度下防寒服静态热阻比较

在环境温度分别为 0 ,10 和 20 ℃,相对湿度均为 65% 且自然对流的条件下,将防寒服常用的 4 种保温材料分别与 4 种不同表层面料组合进行热阻测试,具体结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出,防寒服用组合纺织品的静态热阻与环境温度呈负相关,环境温度越低,其静态热阻越高,且环境温度从 10 ℃ 降至 0 ℃ 时热阻值增幅大于从 20 ℃ 降到 10 ℃ 的增幅,说明同样的温度降幅,环境温度越低,防寒服用组合纺织品的传热性越差。究其原因,热传递是通过流体分子运动或固体分子链/基团的振动而产生,由热力学性质可知,分子运动或分子链振动都随着温度的升高而加剧,因此当温度降低时,分子动能减小,纤维间空气分子运动变慢,纤维自身分子链的振动频率变慢,

热传递性能减弱,故环境温度越低防寒服热阻越高。

另外,分析图 4 可以发现,保温材料与面料 c 组合的静态热阻大于与面料 b 组合的热阻,说明面料 c 的静态热阻大于面料 b 的。结合表 1 可知,面料 c 是短纤,而面料 b 是长丝,热量在短纤维织物中传导要经过大量纤维接触点,相比之下长丝传热通道更为顺畅,故短纤维织物的传导热阻高,隔热性好。但是,在图 3 中面料 b、面料 c 与保温材料组合的热阻

时而大时而小,原因是图 3 的动态热阻受环境风速的影响大,或者说图 3 的动态热阻中包含的纤维间空气对流散热的占比大。与面料 b 相比,面料 c 挡风性差(对流热阻低)、传导热阻高的特性,导致不同环境风速下图 3 和图 4 热阻值的差异。这一结果说明在自然对流的室内使用的被类产品不必强调面料的挡风性,而在室外使用的棉衣、睡袋类产品必须考虑面料的挡风性。

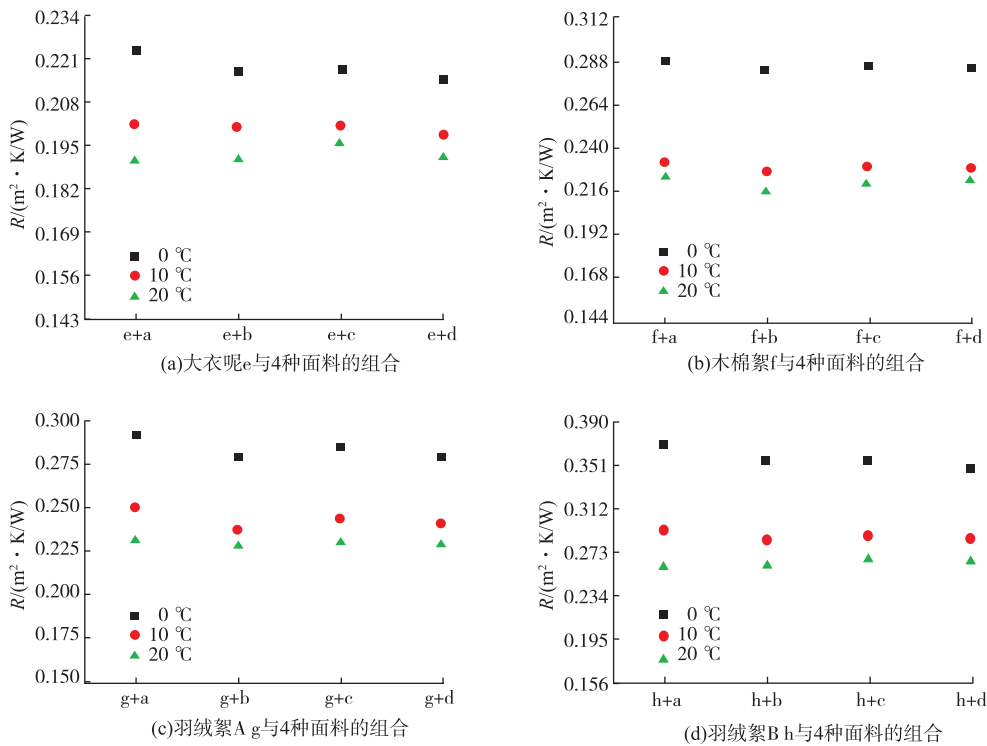


图 4 防寒服用组合纺织品的静态热阻随环境温度的变化

Fig.4 Changes of static thermal resistance of composite textiles for cold protective clothing towards environmental temperature

3 结 语

- 1) 防寒服的保温性与厚度、纤维间堆砌结构密切相关,加入保温材料后保温效果会大幅度提升;在相同面密度条件下,羽绒的保温性能最优;木棉絮料的保温性接近羽绒 B。
- 2) 防寒服用组合纺织品的热阻随外层面料挡风性增强而提高,变化幅度与保温材料种类明显相关;对于纤维间孔隙比较小的木棉絮料和大衣呢,其热阻随外层面料变化的幅度不大;而对于纤维间存在较大孔隙的羽绒材料,保温效果高度依赖外层面料的挡风性,外层面料的挡风性能越好,与羽绒组合的纺织品保温性越好。在室外使用的棉衣、睡袋类产品必须考虑面料的挡风性。

3) 环境条件对防寒服用组合纺织品的热阻影响很大,风速越大所测热阻值越低,在真实有风的使用环境中防寒服用组合纺织品的热阻值低于实验室自然对流时所测热阻。环境温度越低,所测热阻值越大,低温条件下风速对防寒服保温性影响更大。目前,标准环境(20 °C,相对湿度 65%,风速 < 0.1 m/s)下测试的防寒服用组合纺织品热阻与真实使用环境中的相差很大,故纺织品及服装保温性测试应在模拟使用环境的人工气候仓中进行。

参考文献:

[1] SONG Wenfang, WANG Faming, ZHANG Chengjiao, et al. On the improvement of thermal comfort of university students by using electrically and chemically heated clothing in a cold classroom environment[J]. Buing and

- Environment, 2015,94(2/3):704-713.
- [2] 李佳怡, 卢业虎, 叶鑫, 等. 智能发热户外防寒服装研制与性能评价[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2018,44(1):80-86.
- LI Jiayi, LU Yehu, Ye Xin, et al. Performance evaluation of outdoor cold protective clothing with smart heating function[J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2018,44(1):80-86. (in Chinese)
- [3] CUI Zhiying, FAN Jintu, WU Yuensheng. A comparative study on the effects of air gap wind and walking motion on the thermal properties of Arabian thawbs and Chinese cheongsams[J]. Ergonomics, 2016,59(8):999-1008.
- [4] LU Yaming, WANG Fehu, WAN Xianfu, et al. Clothing resultant thermal insulation determined on a movable thermal manikin. part I: effects of wind and body movement on total insulation[J]. International Journal of Biometeorology, 2015,59(10):1487-1498.
- [5] 赵巧宁, 邓光宇, 马保科. 运动引起服装热阻变化的实验分析[J]. 纺织高校基础科学学报, 2015,28(3):385-390.
- ZHAO Qiaoning, DENG Guangyu, MA Baoke. Experimental analysis of the clothing thermal resistance change caused by human body motion[J]. Basic Sciences Journal of Textile Universities, 2015,28(3):385-390. (in Chinese)
- [6] 张文欢, 钱晓明, 师云龙, 等. 服装局部热阻与总热阻的动静态关系及其模型[J]. 纺织学报, 2018,39(7):111-115.
- ZHANG Wenhuan, QIAN Xiaoming, SHI Yunlong, et al. Relationship between static and dynamic thermal insulation of local or whole body and its model[J]. Journal of Textile Research, 2018,39(7):111-115. (in Chinese)
- [7] 闫琳, 夏一哉. 服装隔热性能的测试与分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 1998,21(增1):72-78.
- YAN Lin, XIA Yizai. Test and analysis of the properties of clothing insulation[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 1998,21(Sup.1):72-78. (in Chinese)
- [8] 李亿光, 刘丽英, 刘林. 织物特性对热湿传递性能的影响[J]. 上海纺织科技, 2015,43(2):20-22.
- LI Yiguang, LIU Liying, LIU Lin. Influence of fabric property on its thermal and moisture transfer performances[J]. Shanghai Textile Science and Technology, 2015,43(2):20-22. (in Chinese)
- [9] 赖军, 许静娴, 陈立丽, 等. 服装动态热阻测定及预测模型的研究进展[J]. 纺织学报, 2017,38(5):170-176.
- LAI Jun, XU Jingxian, CHEN Lili, et al. Development and trend of evaluation and prediction model of clothing dynamic insulation[J]. Journal of Textile Research, 2017,38(5):170-176. (in Chinese)
- [10] QIAN Xiaoming, FAN Jintu. A quasi-physical model for predicting the thermal insulation and moisture vapour resistance of clothing[J]. Applied Ergonomics, 2009,40(4):577-590.
- [11] 全国纺织品标准化技术委员会. 纺织品生理舒适性稳态条件下热阻和湿阻的测定:GB/T 11048—2008[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.
- [12] 屠乐希, 杨竹丽, 王茜, 等. 纺织品冷暖感的表征指标[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2018,44(2):218-224.
- TU Lexi, YANG Zhuli, WANG Qian, et al. Characteristic indexes of textile's warm-cool feeling[J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2018,44(2):218-224. (in Chinese)
- [13] 王婷婷, 刘晓霞, 庄明宇. 环境温度对纤维材料导热性能的影响[J]. 上海纺织科技, 2014,42(4):6-9.
- WANG Tingting, LIU Xiaoxia, ZHUANG Mingyu. Influence of environmental temperature on the thermal conductivity of fiber materials[J]. Shanghai Textile Science and Technology, 2014,42(4):6-9. (in Chinese)

(责任编辑:邢宝妹)