

文章编号: 1671-0444 (2018)05-0742-07

纺织面料热阻和湿阻的回归测量法

陈益松^{a,b}, 张聪聪^a

(东华大学 a. 服装与艺术设计学院; b. 现代服装设计与技术教育部重点实验室, 上海 200051)

摘要: 为进一步减小纺织面料热阻及湿阻的测量误差, 提出面料热阻和湿阻的回归测量法, 该方法通过测量 1~4 层面料的总热阻和总湿阻, 经线性回归直接得到面料热阻和湿阻及其上方空气层的热阻和湿阻, 解决了传统测量法使用空板空气层热阻或湿阻代替面料上方空气层热阻或湿阻带入系统误差的问题。试验结果表明, 回归测量法在热阻测量的准确性方面改善尤为明显, 在湿阻测量方面的改善相对较小, 还需进一步研究。

关键词: 纺织面料; 热阻; 湿阻; 回归测量法

中图分类号: TS 941.1 **文献标志码:** A

Fabric Thermal and Evaporative Resistance's Regression Measurement Method

CHEN Yisong^{a,b}, ZHANG Congcong^a

(a. Fashion & Art Design Institute; b. Key Laboratory of Clothing Design & Technology, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 200051, China)

Abstract: In order to further reduce the of measurement error fabric thermal and evaporative resistance, a regression measurement method of fabric thermal and evaporative resistance was proposed. By measuring the total thermal resistance and total evaporative resistance of fabric from layer one to four and performing a linear regression, the fabric thermal and evaporative resistance, air layer thermal and evaporative resistance were obtained directly by the method. It solves the problem that the traditional measurement method carries system error when using thermal resistance or evaporative resistance of empty plate to replace the air layer thermal resistance or evaporative resistance. The experimental results show that the regression measurement method is particularly effective in improving the accuracy of the thermal resistance measurement. The improvement in evaporative resistance measurement is relatively small, and further research is needed.

Key words: fabric; thermal resistance; evaporative resistance; regression measurement method

纺织面料热阻和湿阻依据 ISO 11092—1993、ASTM-F1868 和 GB/T 11048—2008 并使用出汗热板仪(后简称出汗热板仪)进行测量。相对于其他保温率和透湿率测试仪器,出汗热板仪在面料的隔热和透湿性能测量的适用性和统一性较高,因

此在 ISO 11092—1993 发布后,其逐渐成为在国际上广泛认可的仪器^[1-5]。目前用于测量织物热阻及湿阻的出汗热板仪主要有美国西北测试技术公司生产的 SGHP 型出汗热板仪和 ADL Atlas 公司生产的 M259B 型出汗热板仪及国产 YG 606G 型出汗热

收稿日期: 2017-06-01

作者简介: 陈益松(1964—),男,湖南宁远人,教授,博士,研究方向为服装舒适性及光学三维测量等, E-mail: cys@dhu.edu.cn

板仪。出汗热板仪与干式热板仪的区别在于是否加装了出汗系统^[6],两者在热阻测量方面没有区别。

在实际测量中由于仪器之间存在系统差异及稳定性不同等原因,测量结果间仍存在较大误差。文献[7]对比了 YG 606E 型与 YG 606D 型干热板仪依据国际标准测量相同面料的热阻值差异达 21.5%;文献[8]发现 YG 606E 型干热板仪和 SGHP 型出汗热板仪测得的热阻值存在 31% 的差异;对比文献[6]和[9]发现,在同一标准下使用 SGHP 型与 M259B 型出汗热板仪测得的空板热阻值和湿阻值,平均值差异分别达到 54% 和 87%。

文献[8,10]对热护式热板仪的基础结构和外风道系统进行了剖析,指出系统设计问题对系统误差的影响。除仪器本身的系统误差和随机误差外,测量方法本身可能存在的缺陷或是造成测量不准确的重要原因。

在热板仪测量面料热阻和湿阻时,环境风速是重要的影响因素。文献[11]试验证明面料的总热阻和总湿阻与风速呈反比下降。文献[12-15]研究表明服装在假人上的热阻和湿阻测试结果与在热板仪上相似。

本文在研究纺织面料热阻和湿阻传统测量法可能存在的问题的基础上,提出回归测量法理论,设计了不同风速条件来测量各环境条件下的面料热阻与湿阻,并与传统测量方法进行比较,分析讨论了回归测量法的测量结果与传统方法测量产生误差的原因。

1 测量理论

1.1 传统测量法

按照 ISO11092—1993、ASTM-F1868 及 GB/T 11048—2008 的相关定义,面料的热阻由热板仪测量,而湿阻由具有出汗功能的出汗热板仪测量。首先测量热板仪空板热阻或湿阻,再放置面料,测量面料及空气层的总热阻或总湿阻,之后再减去空板热阻或湿阻值,即为面料的热阻或湿阻值,其计算公式如(1)所示。

$$R_f = R_t - R_0 \quad (1)$$

式中: R_f 为面料热阻或湿阻; R_t 为面料及空气层的总热阻或总湿阻; R_0 为空板时所测空气层热阻或湿阻。

然而,由于测量空板热阻时测量表面是粗糙金属,测量空板湿阻时测量表面为纤维素出汗薄膜,而面料表面则是多孔隙交错的纤维表面,其向外的热辐射力是不同的^[16],传导和对流也会因表面的形态

不同而不同。因此,将热板表面空气层的热阻或湿阻等同于面料表面空气层热阻或湿阻,这是一种假设,在热板仪测量薄型面料热阻时,常出现负值,可能就是该原因导致的。

1.2 回归测量法

热板仪常采用标样多层叠加测量进行校准,若每层的热阻或湿阻都是独立的,那么多层标样的热阻或湿阻串联相加符合传热传质学中热阻或湿阻的串联原理。文献[4]也证实多层叠加标准面料的热阻与面料层数基本成线性变化,线性拟合度大于 0.9。

根据热阻串联原则,在测量面料热阻的过程中,通过各层面料的热流量相同。另外,当多层面料自然平铺叠加时,受重力影响,面料之间空气层基本为零,多层面料热阻值近似等于各层面料热阻和最上层静止空气层热阻之和。根据传热传质相似原理,湿阻的测量也与热阻测量相似。因此,多层叠加面料的热阻或湿阻的计算如式(2)所示。

$$R_{tn} = nR_f + R_{f0} \quad (2)$$

式中: R_{tn} 为相应层数面料及空气层的总热阻或湿阻; n 为面料层数, $n = 1, 2, 3, \dots$; R_f 为单层面料热阻或湿阻; R_{f0} 为面料上方空气层的热阻或湿阻。

回归测量法测量面料热阻及湿阻的原理如图 1 所示,其核心在于 1~ n 层的总热阻或总湿阻测量。根据面料层数 n 以及各层面料所测得的总热阻及总湿阻值 R_{tn} 进行回归,得到的回归系数即为单层面料的热阻或湿阻 R_f ,回归常数即为面料上表面空气层的热阻或湿阻 R_{f0} 。从理论上讲,回归测量法解决了传统方法中空板空气层热阻及湿阻和面料上方空气层热阻及湿阻不同的问题,可以精确测量面料的热阻、湿阻及面料上方空气层的热阻、湿阻。

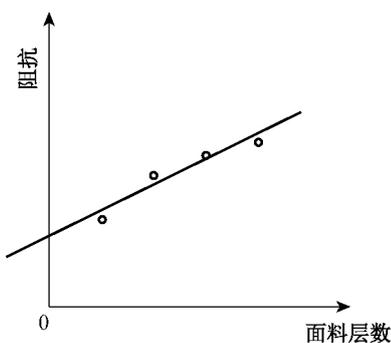


图 1 回归测量法测量面料热阻或湿阻的原理
Fig. 1 Principle of fabric thermal or evaporative resistance's regression measurement method

2 试验条件与方法

2.1 试验条件

ISO 11092—1993、GB/T 11048—2008 及 ASTM-F1868 对热阻和等温湿阻的测量方法基本相同,但 ASTM-F1868-02 Part C 因涉及非等温湿阻的测量与该标准下的热阻相关联,同时此热阻的测量环境温度比 ISO 11092—1993 及 GB/T

11048—2008 中的热阻测量环境温度高 5 °C,但文献[6]研究表明 5 °C 的环境温度差异对热阻的测量结果影响不大。因此综合考虑后采用表 1 的试验条件,即热阻和非等温湿阻参照 ASTM-F1868-02 Part C,而等温湿阻参照 ASTM-F1868-02 Part B。本试验使用美国西北测试技术公司生产的 SGHP-10.5 型出汗热板仪。

表 1 热阻和湿阻测量试验条件

Table 1 Thermal and evaporative resistance experiment conditions

参考标准	测量项目	热板温度/°C	环境温度/°C	相对湿度/%	风速/(m·s ⁻¹)
ASTM-F1868-02 Part C	热阻	35	25	65	0.5,1.0,1.5
ASTM-F1868-02 Part B	等温湿阻	35	35	40	0.5,1.0,1.5
ASTM-F1868-02 Part C	非等温湿阻	35	25	65	0.5,1.0,1.5

热阻是由温差引起的,其基本计算式为

$$R_{ct} = \frac{T_s - T_a}{Q/A} \quad (3)$$

式中: R_{ct} 为面料总热阻; T_s 和 T_a 分别为测试板和环境温度; Q 为通过测试板的热流量; A 为测试板的面积。

在等温湿阻测量中,由于环境温度与热板温度一致,不需要考虑干热散失的影响,其测量所得测试板的所有热损失都是由蒸发造成,其计算式为

$$B-R_{ct} = \frac{p_s - p_a}{Q/A} \quad (4)$$

式中: $B-R_{ct}$ 为面料等温总湿阻; p_s 和 p_a 分别为面料下方和面料上方水蒸气压力。

等温湿阻的测量消除了单纯的干热传递损耗,但现实中的大部分情况符合非等温湿阻测量的条件,既要考虑干热传递损耗,又要考虑蒸发热损耗,ASTM-F 1868-02 Part C 就采用了非等温湿阻测试方法,其计算式为

$$C-R_{ct} = \frac{p_s - p_a}{\frac{Q}{A} - \frac{T_s - T_a}{R_{ct}}} \quad (5)$$

式中: $C-R_{ct}$ 为面料非等温总湿阻。

2.2 试验方法

预试验在风速为 0.5 和 1.5 m/s 条件下,随机选择 2 种面料进行多层叠加面料热阻和湿阻的测量,发现当面料在叠加至 5 层时出现严重润湿情况,导致测量结果难以稳定,因此确定正式试验的面料层数为 1~4。

正式试验选择包含标准面料在内的 9 种不同厚

度纺织面料,使用 YG(B)141D 型数字式织物厚度仪对试验面料进行厚度测量,使用精确到毫克的天平秤进行织物的面密度测量,结合使用燃烧法、化学溶解法进行纤维成分的判断,得到面料基本信息如表 2 所示。

表 2 织物规格参数表

Table 2 Fabric specification parameters

试样编号	纤维组成	厚度/mm	面密度/(g·m ⁻²)
1#	腈纶	0.67	257.4
2#	棉	0.46	240.0
3#	棉/腈纶	0.87	235.7
4#	涤纶	0.45	197.6
5#	麻/棉	0.58	214.0
6#	涤纶	0.45	164.6
7#	涤纶	0.19	74.4
8#	棉	0.32	101.1
9#	黏胶	0.16	40.3

依据传统测量方法在各风速条件下测量 3 次单层面料总热阻、等温总湿阻和非等温总湿阻,以及对空板的热阻、等温湿阻和非等温湿阻。将所得到的面料总热阻、等温湿阻及非等温湿阻减去对应空板热阻、等温湿阻和非等温湿阻,所得面料热阻、等温湿阻、非等温湿阻记为 R_{cf} 、 $B-R_{ef}$ 、 $C-R_{ef}$,空板热阻、等温湿阻及非等温湿阻记为 R_{cf0} 、 $B-R_{ef0}$ 、 $C-R_{ef0}$ 。

在不同风速条件下测量 1 至 4 层叠加面料的总热阻、等温总湿阻及非等温总湿阻。将所得数据与面料层数进行线性回归,所得回归系数即为回归测量法所得单层面料的热阻、等温湿阻、非等温湿阻,记为 R_{cf}^* 、 $B-R_{ef}^*$ 、 $C-R_{ef}^*$,所得回归常数即为回归

测量法所得面料上方空气层热阻、等温湿阻、非等温湿阻, 记为 R_{ef0}^* 、 $B-R_{ef0}^*$ 、 $C-R_{ef0}^*$ 。

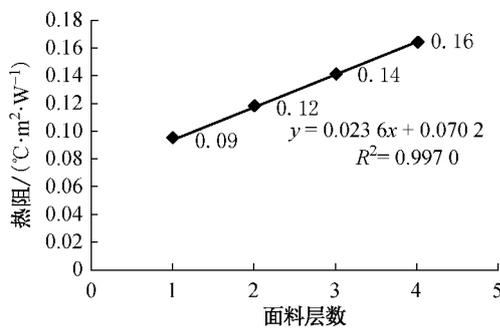
需要指出的是, 传统测量法测量一块面料的热阻或湿阻连同空板值需要进行 4 次试验, 而回归测量法无需测量空板值, 4 次叠加也仅需要进行 4 次试验。

3 试验结果与分析

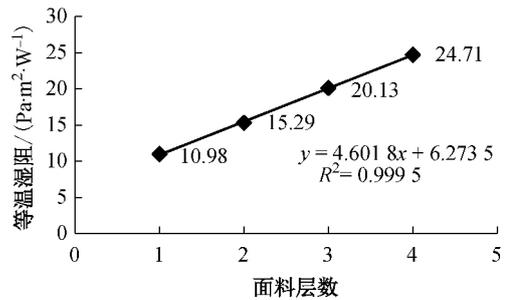
3.1 标准面料回归图

对 9 种面料的热阻、等温湿阻和非等温湿阻分别进行回归拟合, 三者的回归拟合度均值分别为 0.99、0.98、0.99, 均属于高度拟合。

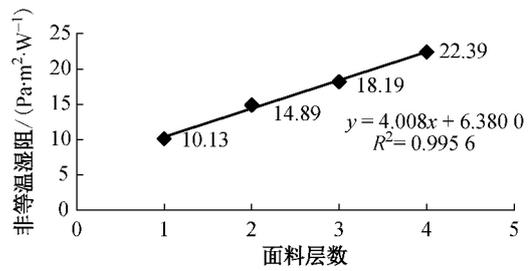
1# 面料是美国西北测试技术公司随 SGHP-10.5 型出汗热板仪一起提供的标准面料, 紧度和厚度均为中等的腈纶平纹织物, 经测试可知其经过拒水处理。在风速为 1 m/s 条件下 1# 面料热阻、等温湿阻和非等温湿阻回归如图 2 所示。



(a) 热阻



(b) 等温湿阻



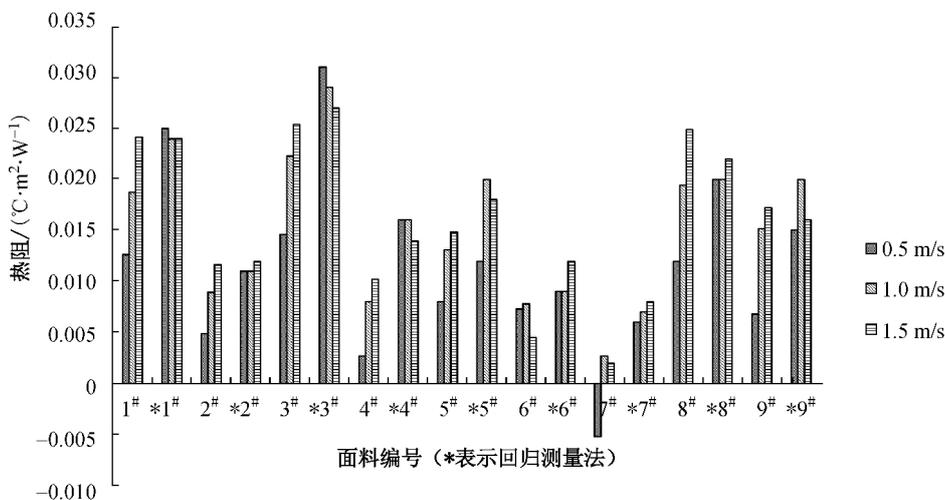
(c) 非常温湿阻

图 2 在风速为 1 m/s 条件下标准面料热阻、等温湿阻、非等温湿阻的回归图

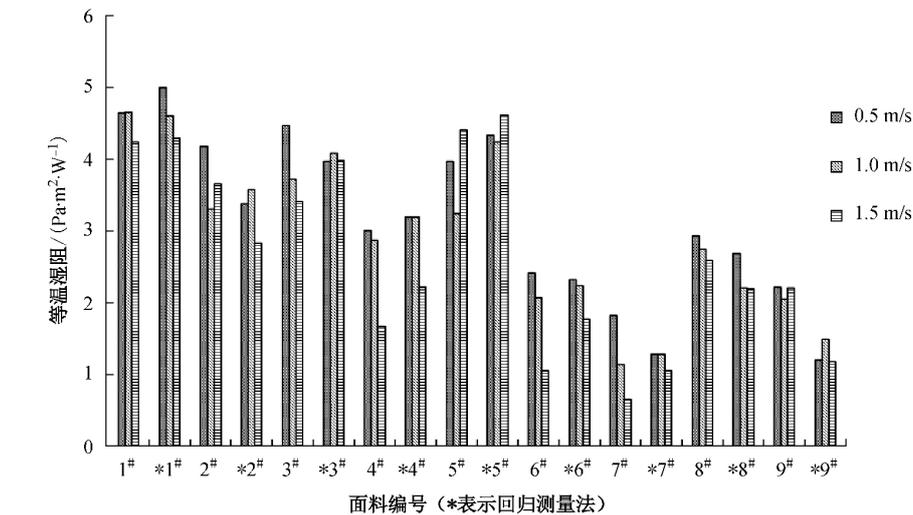
Fig. 2 Thermal resistance, isothermal and non-isothermal evaporative resistance's regression of standard fabric under wind speed of 1 m/s

3.2 面料及空气层测量结果分析

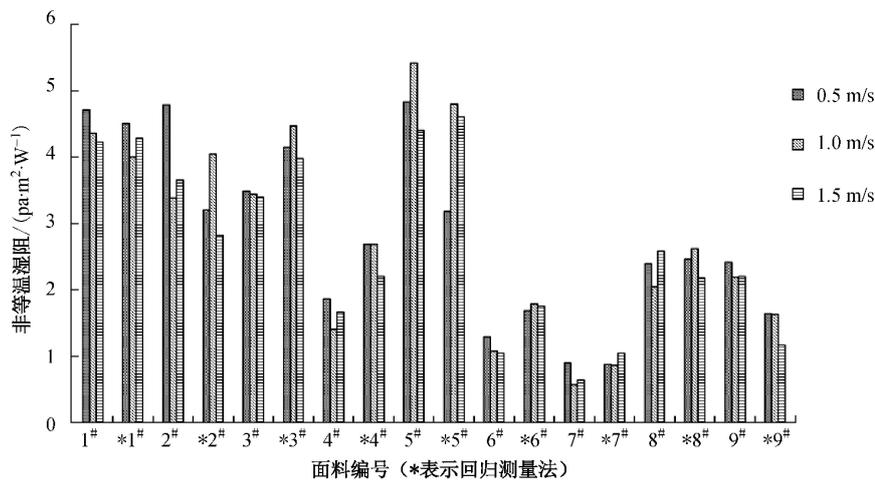
在 3 种风速条件下传统测量法和回归测量法测得的面料热阻、等温湿阻和非等温湿阻的对比如图 3 所示。



(a) 热阻



(b) 等温湿阻

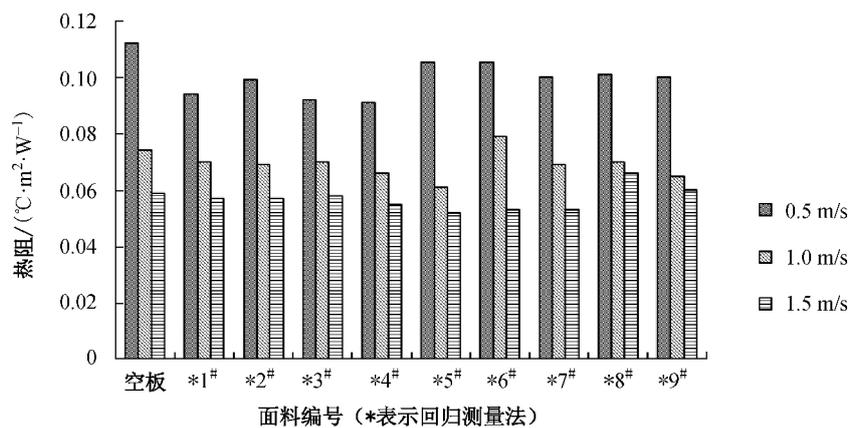


(c) 非等温湿阻

图 3 面料热阻、等温湿阻、非等温湿阻两种测量方法比较

Fig. 3 Comparison of two methods for measuring fabric thermal resistance, isothermal and non-isothermal evaporative resistance

在 3 种风速下回归测量法与传统测量法所测得 对比如图 4 所示。
各面料上方空气层热阻、等温湿阻和非等温湿阻的



(a) 热阻

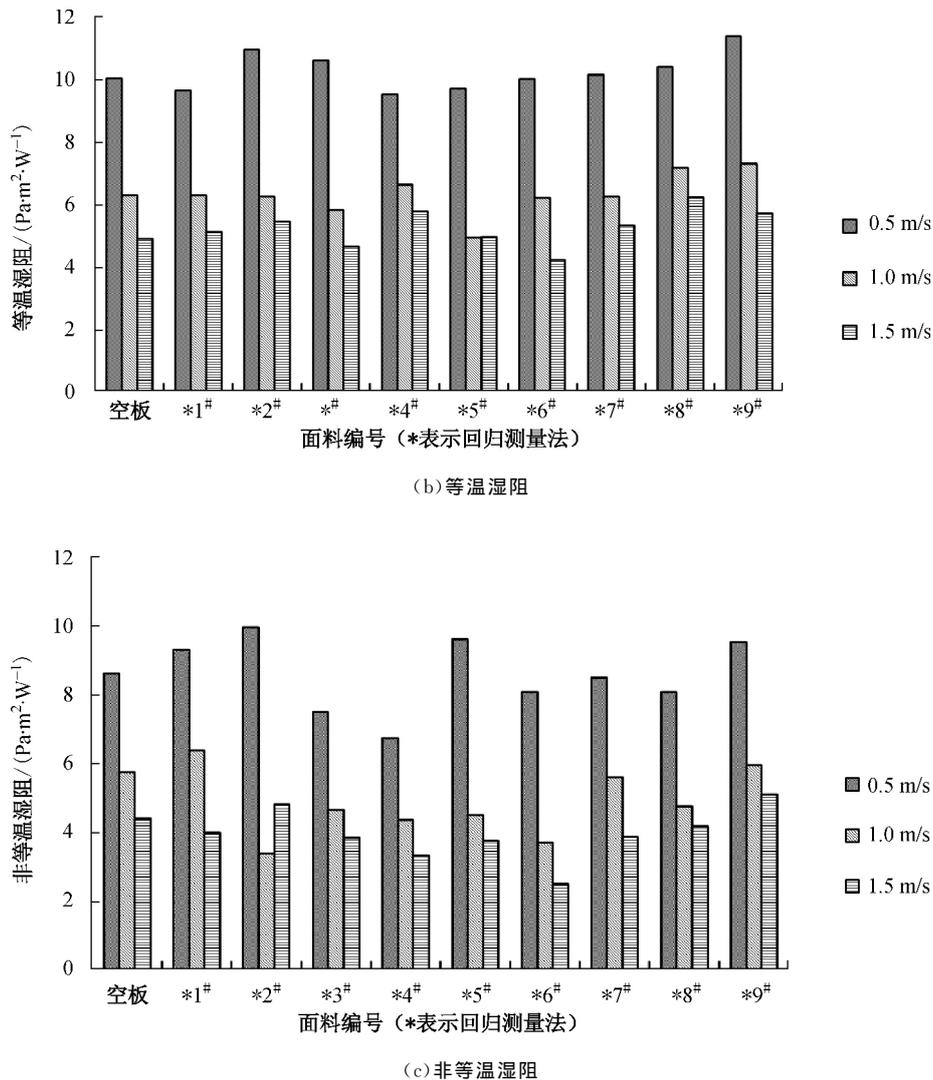


图 4 空气层热阻、等温湿阻、非等温湿阻两种测量方法比较

Fig. 4 Comparison of two methods for measuring air layer thermal resistance, isothermal and non-isothermal evaporative resistance

综合分析图 3 和 4 可知:

(1) 将回归法得到的面料热阻或湿阻分别与对应空气层的热阻或湿阻相加得到面料的总热阻或总湿阻, 与传统测量法所得到面料的总热阻或总湿阻相似, 均随风速的增加而下降, 与文献[11]的测量结果相似。

(2) 在面料的总热阻及总湿阻随风速增加而下降的同时, 面料本身的热阻及湿阻也应同步下降, 这是多孔介质纺织面料的基本特性。然而, 使用热板仪按传统方法测量的结果却并非如此, 特别是针对面料热阻的测量。虽然空气层热阻随风速增加而下降, 但 9 种面料中有 7 种面料的热阻随风速的增大而增大, 还有一种较薄面料(7#)在风速为 0.5 m/s 条件下, 其热阻出现负值, 这都与空板空气层热阻值不正常变化有关, 导致测试结果与实际情况不符。

文献[11]中仅公布了面料总热阻和湿阻随风速增加而下降的情况, 却没有公布面料本身的热阻和湿阻值, 或许碰到了相似难以解释的情况(其使用的出汗热板仪和本文相同)。由此说明, 出汗热板仪在使用过程中将空板热阻值来代替面料上表面空气层热阻值存在较大问题。而回归法测量的大部分面料上方空气层热阻比传统测量的空板热阻小, 使面料热阻随风速增加而大幅增加的不正常现象得到基本遏制, 同时消除了测量热阻时出现负值的情况。因此回归法能有效修正热阻测量的系统误差。

(3) 传统方法测量的等温湿阻并未像热阻一样出现随风速增大而增大的情况, 多数面料的非等温湿阻随风速增加而下降。相比热阻而言, 同一面料不同风速下的等温湿阻值相对差异较小, 推测面料等温湿阻随风速的变化较小, 而这种变化又被掩盖

在随机误差之下。相对于传统空板测量法,回归法测量的空气层等温湿阻波动较大,可能由于不同面料表面与热板仪出汗纤维膜表面的差异所造成,但也包含了随机误差。

(4)非等温湿阻的测量由于带入了干热阻的测量值,其误差也一并带入,因此面料及空气层的非等温湿阻值的波动也比等温湿阻大。

4 结 语

本文提出了面料热阻和湿阻的回归测量法,该方法通过测量逐层叠加面料的总热阻和总湿阻,进行线性回归直接得到单层面料的热阻和湿阻及其上方空气层的热阻、湿阻,从原理上解决了传统测量法中空板上空气层热阻和湿阻与面料上方空气层热阻和湿阻并不一致的问题。

回归测量法试验充分发挥了热板仪在测量面料总热阻和总湿阻方面灵敏度高的优势,在面料的热阻、等温湿阻和非等温湿阻的回归中均得到了很高的线性拟合度。

试验结果表明:在热阻测量方面,回归法大大改善了测量的准确度,使面料的热阻基本呈现随风速增加而下降,完全克服了薄型面料常出现的热阻为负值情况;在等温湿阻测量方面,相对于传统测量法,回归法的测量结果改善不明显;非等温湿阻由于两级运算导致数值波动较大,还特别涉及出汗蒸发传递机制,有待于进一步研究。

参 考 文 献

- [1] HUANG J H. Sweating guarded hot plate test methods[J]. *Polymer Testing*, 2006, 25(5): 709-716.
- [2] 郭禹. 纺织品保温性能检测中存在的问题[J]. *纺织科学研究*, 2006(4): 1-8.
- [3] 黄建华, 钱晓明. 织物透湿性测试方法的比较[J]. *纺织学报*, 2008, 29(8): 45-47.
- [4] 张森, 宋湛华, 邱学明. ASTM 类型纺织品热传导性能测试仪器的分析和研究[C]//第十届中国纤维优秀论文汇编. 北京: 中国纺织出版社, 2007: 34-43.
- [5] SHABARIDHARAN, DAS A. Study on heat and moisture vapour transmission characteristics through multilayered fabric ensembles[J]. *Fibers and Polymers*, 2012, 13(4): 522-528.
- [6] 陈益松, 徐军, 袁春艳. 出汗热护式热板仪系统的设计分析与试验研究[J]. *纺织学报*, 2015, 36(3): 128-134.
- [7] 詹卓, 陈益松. 面料热阻测量在 GB/T 11048 新旧标准中的差异[J]. *纺织学报*, 2013, 34(9): 68-72.
- [8] 陈益松, 詹卓. 热护式热板仪基础结构及系统误差分析[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2014, 40(5): 575-581.
- [9] 景晓宁, 李亚滨. 织物热湿舒适性评价指标的灰色理论研究[J]. *国际纺织导报*, 2011(4): 70-75.
- [10] 陈益松, 祝斌. 热护式热板仪风道系统的研究[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2016, 42(6): 835-840.
- [11] 丁殷佳. 风速与汗湿对运动服面料热湿舒适性的影响及综合评价[D]. 杭州: 浙江理工大学服装学院, 2016: 39-49.
- [12] HAVENICH G HEUS R, LOTENS W A. Resultant clothing insulation: A function of baby movement, posture, wind, clothing fit and ensemble thickness[J]. *Ergonomics*, 1990, 33(1): 67-84.
- [13] 闫琳, 夏一哉. 服装隔热性能测试与分析[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 1998, 21(S1): 72-78.
- [14] 于瑶, 钱晓明, 范金土. 风速与步速对服装表面空气层热阻的影响[J]. *纺织学报*, 2009, 30(8): 107-112.
- [15] MORRISSEY M P, ROSSI R M. The effect of wind, body movement and garment adjustments on the effective thermal resistance of clothing with low and high air permeability insulation[J]. *Textile Research Journal*, 2014, 84(6): 585-592.
- [16] 徐军, 陈益松, 甄慧英, 等. 基于红外热像技术的织物红外发射率测量方法[J]. *纺织学报*, 2009, 30(9): 41-44.

(责任编辑: 徐惠华)