

DOI: 10.13475/j.fzxb.20170903005

服装局部热阻与总热阻的动静态关系及其模型

张文欢¹, 钱晓明¹, 师云龙¹, 范金土^{1,2}, 牛 丽¹

(1. 天津工业大学 纺织学院, 天津 300387; 2. 康奈尔大学 人类生态学院, 美国 纽约 14850)

摘要 为研究人体在静止站立和行走时服装局部热阻之间的比例关系, 以及真人测试和假人测试服装总热阻之间的关系, 利用热流计法测定人体设定的10个部位的热流密度, 计算得到服装局部的热阻, 通过面积系数计算得到站立和行走状态的服装总热阻; 然后对不同测试条件下各部位服装的动静态热阻进行线性拟合, 得到拟合斜率, 并探讨了不同状态对服装热阻的影响。结果显示: 动态热阻明显低于静态热阻, 10个部位动态模拟斜率依次为0.72、0.75、0.87、0.74、0.76、0.83、0.82、0.90、0.61、0.64; 斜率小于或等于0.76的部位受运动的影响显著。最后得到真人测试的静态热阻和动态热阻, 真人和假人测试得到的静态热阻以及动态热阻之间的数字模型。

关键词 服装热阻; 热流密度; 局部热阻; 总热阻; 热舒适性

中图分类号: TS 941.17; 文献标志码: A

Relationship between static and dynamic thermal insulation of local or whole body and its model

ZHANG Wenhuan¹, QIAN Xiaoming¹, SHI Yunlong¹, FAN Jintu^{1,2}, NIU Li¹

(1. School of Textiles, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

2. College of Human Ecology, Cornell University, New York 14850, USA)

Abstract In order to study the relationship of local thermal insulation between standing and walking states and the relationship of the total thermal insulation between the human testing and thermal manikin testing, the heat flow density of 10 parts of human body were measured by the heat flow meter method firstly, and the thermal insulation of standing and walking were calculated by the area coefficient. Secondly, the dynamic and static thermal insulation of each part were linearly fitted. The relationship between the thermal resistance ratio and the slope of the fitted straight line was evaluated. The results show that the dynamic thermal resistance is significantly lower than the static thermal resistance, and the ratio of dynamic and static follows by 0.72 0.75 0.87 0.74 0.76 0.83 0.82 0.90 0.61 0.64. The parts that the slope smaller than or equal to 0.76 is significantly affected by the moving. Finally, the digital model between static and dynamic thermal insulation of the human testing, and the relationship between the human testing and thermal manikin testing under static condition, the relationship between the human testing and thermal manikin testing under dynamic condition were obtained.

Keywords thermal insulation of clothing; heat flow density; local thermal insulation; total thermal insulation; thermal comfort

服装作为人体与环境的中间层, 在传热传湿过程中主要起到隔热、透湿、透气的作用。服装热阻是评价服装热传递性能的重要指标之一, 服装本身(服装结构与款式^[1]、厚度、水分含量^[2]、层数^[3]、微气

候^[5-6])、人体生理活动(着装姿势、活动量^[6-7]、皮肤表面温度)、外界环境条件(热辐射、风速^[6-7]、等温与非等温)等都对其产生重要的影响。服装动静态热阻研究对功能服装设计、暖体假人设计等起到至关重要

收稿日期: 2017-09-14 修回日期: 2018-04-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1607117); 天津市应用基础与前沿技术计划项目(16JCZDJC36400); 天津市科技计划项目(14TXGCCX00014)

第一作者简介: 张文欢(1993—), 女, 硕士生。主要研究方向为人体工效学与服装热湿舒适性。

通信作者: 钱晓明, E-mail: qianxiaoming@tjpu.edu.cn。

的作用,局部服装热阻的研究对人体出汗图谱式服装(body mapping 服装)的设计有着重要的理论支持,对服装局部热舒适性评价具有重要的作用。

随着数据库的丰富,已有众多学者针对动静态热阻之间的关系进行探究。Qian 等^[8]利用暖体假人“Walter”探究了风速和步速对服装热阻、湿阻的影响。于瑶等^[9]在此基础上对服装空气层热阻与风速步速的关系进行了分析,并得到了相应模型。Nilsson 等^[10]将面料透气性、风速和行走速度同时考虑在内,得到热阻与面料透气性、风速和行走速度的关系。Havenith 等^[11]在 Nilsson 的研究基础上进行改进得到新模型,提高了相关系数。赵巧宁等^[12]利用热流法定量分析了真人实验中环境温度、运动、风速对服装热阻的影响。赖军等^[13]对服装动态热阻测量因素、方法以及模型进行了分类总结。除服装总热阻外, Lu 等^[14]利用暖体假人测量了人体 8 个不同部位的服装热阻,并探讨了运动对其产生的影响,推导出相关公式。虽然现有研究已经在不断完善中,但是针对局部服装动静态热阻之间的关系还有待进一步探讨,在不同环境条件下测量得到的关系也有待验证。此外,现有研究主要集中在真人动静态热阻之间的关系以及假人动静热阻态之间的关系,鲜有针对真人与暖体假人的动态热阻关系、静态热阻关系的研究。

本文主要是针对真人实验中,人体背、腰、胸、腹、臀、大腿前、大腿后、小腿、上臂、下臂 10 个部位热阻的动静态关系以及整套服装热阻在真人结果与暖体假人“Walter”结果之间的关系进行探讨,得到相关模型,以期对服装设计提供数据支持,对暖体假人“Walter”设计的修正与改进提供理论依据。

1 实验部分

1.1 实验仪器

热流密度测量仪(g-SKIN 热流计,瑞士 GREEN TEG 公司生产)。热流计是利用热流传感器接收信号并产生与热流成正比的输出电压,输出电压除以传感器灵敏度,即可得到热流值并显示在电脑终端。每个热流传感器均附有单独的灵敏度。整套服装的总体热阻采用站立式出汗暖体假人“Walter”测量。

1.2 实验人员与服装

人员:年龄为 22~25 岁,身高为(174±3)cm,体重为(70±2)kg,身体质量指数 BMI 为 20~24 的中国成年健康男性。

服装:规格为 175/96A 的短款合体薄型羽绒服(含绒量 90%)4 套,纯棉内衣和运动裤。整套服装包括纯棉内衣(上装+下装)、运动裤以及单件羽绒服。服装的基本性能如表 1 所示。

表 1 服装基本性能

Tab. 1 Basic performance of clothing

服装编号	静态热阻/ (°C·m ² ·W ⁻¹)	湿阻/ (Pa·m ² ·W ⁻¹)	动态热阻/ (°C·m ² ·W ⁻¹)
套装 1#	0.335	30.495	0.277
套装 2#	0.353	32.880	0.291
套装 3#	0.383	39.215	0.316
套装 4#	0.393	38.620	0.325

1.3 热流密度测定

采用热流密度测量仪在环境温度为 13 °C,相对湿度为 35% 的条件下测量 4 名要求人体分别穿着 4 套实验服装时左半个身体区域内背、腰、胸、腹、臀、大腿前、大腿后、小腿、上臂、下臂 10 个部位的热流密度(站立和以 2 km/h 速度行走)。为避免误差,测量部位事先确定并进行标注。同时,利用暖体假人系统中温湿度监测系统测定人体局部皮肤表面温度。测试项目选择在每天同一时间进行,减小人体自身变化对结果的影响。

1.4 真人测试局部服装热阻

真人测试局部服装热阻,即真人测试服装及表面空气层总的热阻为

$$I_1 = \frac{A_s(t_s - t_a)}{H_d} = \frac{(t_s - t_a)}{q_d} = \frac{(t_s - t_a)}{q - q_e} \quad (1)$$

式中: I_1 为真人测试局部服装热阻,°C·m²/W; t_s 为皮肤表面的温度,°C; t_a 为环境温度,°C; H_d 为设定环境中干热损失量,W; q 为设定环境中测试的总热流密度,W/m²; q_e 为设定环境中测试的潜热流密度,W/m²; q_d 为设定环境中测试的干热流密度,W/m²。

1.5 真人测试整体服装热阻

参照文献[15]中计算平均皮肤温度的方法,将局部热阻进行加权计算得到服装的总热阻,并分析运动对真人测试和假人测试得到的服装热阻的影响。总热阻的计算公式为

$$I = I_{背} \times 0.0475 + I_{腰} \times 0.0475 + I_{胸} \times 0.0912 + I_{腹} \times 0.0601 + I_{臀} \times 0.0637 + I_{大腿前} \times 0.1394 + I_{大腿后} \times 0.1394 + I_{小腿} \times 0.1266 + I_{上臂} \times 0.0986 + I_{下臂} \times 0.06 \quad (2)$$

式中: I 为总热阻,°C·m²/W; I_i 为 i 部位的热阻计算值,°C·m²/W。头部不属于服装覆盖范围,不计入总数。

2 结果与讨论

2.1 不同运动状态下服装局部热阻关系

根据 4 个人在 13 °C、不同活动状态(站立和以 2 km/h 低速行走)下穿着相同服装时的热流密度计算得到局部热阻值,取其均值作为最终局部热阻,按照人体在静止和行走状态下最终局部热阻绘制关系曲线,如图 1 所示。

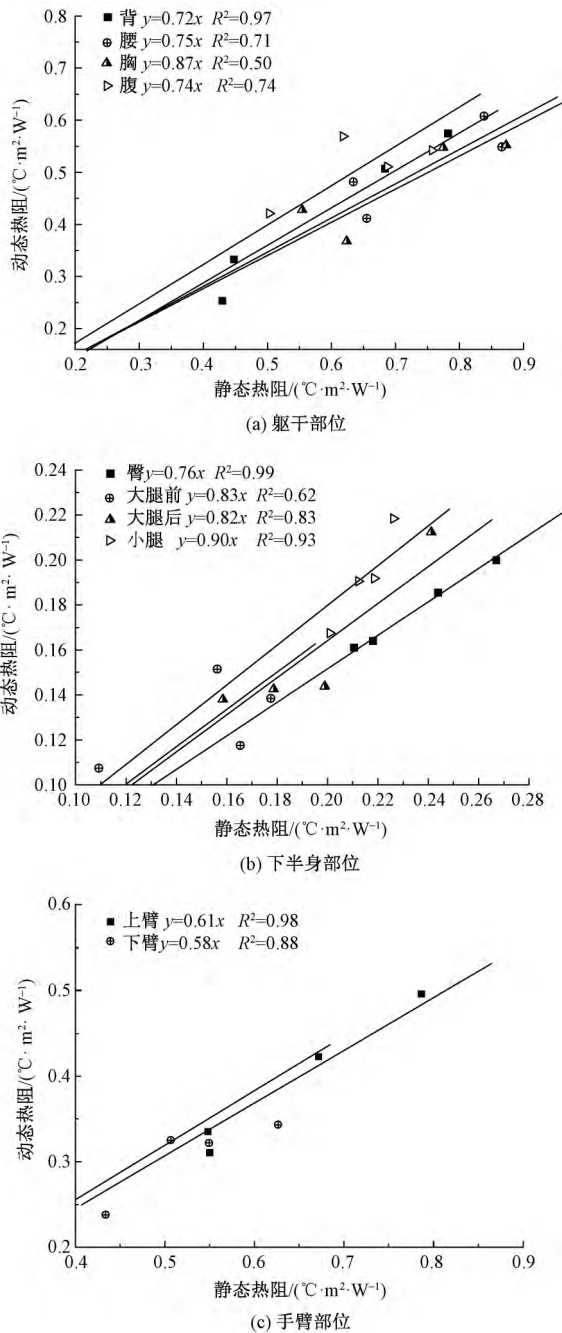


图 1 静态和动态局部热阻模拟曲线

Fig. 1 Simulation curves of static and dynamic local thermal insulation. (a) Trunk; (b) Lower body; (c) Arm

图 1 示出服装上半身躯干部位、下半身、手臂

3 个区域内真人测试得到的动静态热阻的线性回归模型。可看出:线性关系的系数均小于 1,说明服装各部位动态热阻均低于静态热阻;在 3 个区域中,区域内的斜率差异较小,说明在相对应的区域内服装的静态热阻和动态热阻之间的关系一致,受运动状态的影响相对一致;手臂部位的斜率最低,偏离 $y = x$ 这条线最远,动态热阻与静态热阻的差距最大,说明该部位最容易受到运动状态的影响,这主要是因为行走过程中上、下手臂发生摆动,外界冷空气进入服装内部,服装微气候内温湿度与环境产生对流,这种对流破坏了微环境状态,使得人体对外界变化产生反应,从而导致测量值更低。其中,特殊位置为小腿部位,在行走状态和站立状态下的热阻变化量小,这一方面是因为下半身穿纯棉内衣与运动裤,本身的保暖效果比上半身差,所以在一定的运动变化范围内热阻变化量也较小;另一方面是因为下半身穿宽松敞口的运动裤,在站立状态下外界环境与服装微环境之间的对流明显高于其他部位,在人体以较低速度行走时服装发生形变,产生一定量的对流变化,但是由于站立状态的对流已较大,此时的变化率很小,所以小腿部位在 2 种状态下的值更为相近;其他部位的斜率在 0.72 ~ 0.87 之间,受运动状态的影响程度较为一致,运动状态热阻的降低率为静止状态的 13% ~ 28%。

对真人测试的 4 套服装各部位站立和行走状态下计算得到的热阻进行配对 t 检验,结果如表 2 所示。

表 2 站立和行走状态下服装局部热阻配对结果

Tab. 2 Paired results of local thermal insulation between standing and walking state

配对顺序	P 值	显著性
背	0.003	显著
腰	0.011	显著
胸	0.139	不显著
腹	0.017	显著
臀	0.018	显著
大腿前	0.140	不显著
大腿后	0.103	不显著
小腿	0.447	不显著
上臂	0.001	显著
下臂	0.032	显著

由表 2 可知,在服装动静态热阻模拟曲线的斜率小于或等于 0.76 的人体各部位,运动对结果产生显著影响,这也充分说明当动态热阻降低率高于静态热阻的 24% 时,运动对结果产生较大的影响。

2.2 真人与假人测试总热阻的关系

为进一步评价人体不同活动状态下服装总热阻

之间的关系 将真人测试的局部值按照面积公式加权求平均值 得到总热阻。真人测试的静态和动态服装总热阻的线性回归模拟关系如图 2 所示。

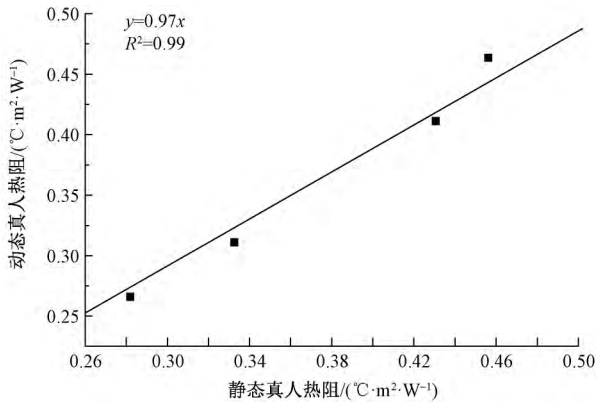


图 2 真人动静态总热阻的关系

Fig. 2 Relationship between static and dynamic total thermal insulation of human testing

从图 2 可看出,动态与静态热阻之间的模拟曲线斜率为 0.97 模拟复相关系数达到 0.99。说明动态热阻低于静态热阻,但是在现有研究的 2 种状态下,运动对真人测试的服装总热阻的影响较小。热阻的变化主要是由于人体在运动状态下服装发生较大的形变,空气层厚度产生变化,内部热空气发生流动,并有部分热空气与冷空气之间产生交换,人体皮肤表面的温度降低,温差减小,从而使动态热阻减小。

真人和假人测试得到的静态热阻之间的关系如图 3 所示,真人和假人测试得到的动态热阻之间的关系如图 4 所示。

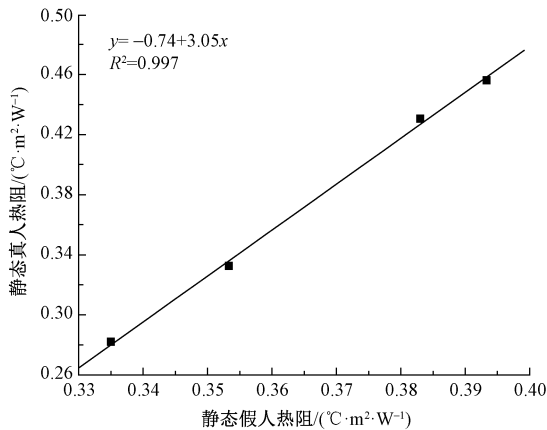


图 3 静态条件下真人和假人测试服装总热阻的关系

Fig. 3 Relationship between human testing and manikin testing thermal insulation of garment under static condition

从图 3 可看出,真人与假人在测试环境与条件下分别穿着不同服装测量得到的结果呈现的趋势一致,真人和假人测试得到的静态总热阻之间的定量拟合

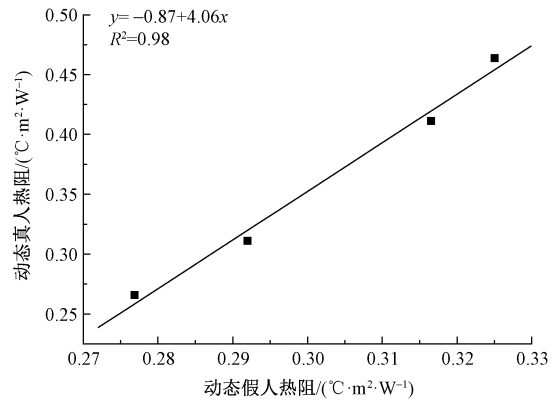


图 4 动态条件下真人和假人测试服装总热阻的关系

Fig. 4 Relationship between human testing and manikin testing thermal insulation of garment under dynamic condition

关系为 $y = -0.74 + 3.05x$,复相关系数达到 0.997。其中,在服装热阻较小时,假人测得的结果高于真人测试的结果,但是当服装热阻超过 $0.36 \text{ °C} \cdot \text{m}^2 / \text{W}$ 时,真人测试的结果将会高于假人测试的结果。这一方面是因为当服装热阻增大时,真人更容易产生温暖感;另一方面是因为热阻达到一定值时,人体体表的汗液蒸发量增加,潜热散失量增多,计算过程中利用总热减去潜热得到的干热值减少,从而使热阻值有所增加。

从图 4 可看出,真人与假人测试得到的动态热阻之间的显性拟合关系为 $y = -0.87 + 4.06x$,其中当服装热阻为 $0.28 \text{ °C} \cdot \text{m}^2 / \text{W}$ 时,真人测试结果与假人测试结果相等,达到测试平衡点。

比较静态和动态测试平衡点热阻,动态显然低于静态。这一方面是由于同一套服装本身的动态热阻小于静态热阻;另一方面是由于动态热阻的斜率高于静态,说明相同服装进行动态真人测试时,与假人测试结果之间更快地产生差距,热阻变化率更快速。

3 结 论

1) 真人测试结果表明,人体各部位的服装局部动态热阻低于静态热阻,在上臂和下臂的热阻变化最大,小腿的热阻变化最小。其余上半身和下半身区域内部的动静态热阻比例关系相近。

2) 局部热阻测试表明,斜率不大于 0.76 部位的动静态热阻之间差异显著。说明变化率高于 24% 时,运动对热阻产生显著影响。

3) 真人测试时,动静态总热阻之间的关系式为 $y = 0.97x$, $R^2 = 0.99$; 静态测试时,真人测试和假人测试结果之间的关系为 $y = -0.74 + 3.05x$, $R^2 =$

0.997; 动态测试时, 真人测试和假人测试结果之间的关系为 $y = -0.87 + 4.06x$, $R^2 = 0.98$ 。 FZXB

参考文献:

- [1] 杨敏, 束琴琴, 戴宏钦, 等. 面料热湿性能对服装热舒适性的影响[J]. 现代丝绸科学与技术, 2015, 30(4): 129-132.
YANG Min, SHU Qinqin, DAI Hongqin. The effects of wet fabric thermal properties on clothing thermal comfort[J]. Modern Silk Science & Technology, 2015, 30(4): 129-132.
- [2] WANG F M, SHI W, LU Y, et al. Effects of moisture content and clothing fit on clothing apparent 'wet' thermal insulation: a thermal manikin study[J]. Textile Research Journal, 2016, 86(1): 57-63.
- [3] 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(SI): 72-78.
YAN Lin, XIA Yizai. Test and analysis of the properties of clothing insulation[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition), 1998, 21(SI): 72-78.
- [4] WANG F M, PENG H, SHI W. The relationship between air layers and evaporative resistance of male Chinese ethnic clothing [J]. Applied Ergonomics, 2016, 56: 194-202.
- [6] CUI Z Y, FAN J T, WU Y S. 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, 2015, 59(8): 1-10.
- [7] LU Y, WANG F, WAN X, et al. Clothing resultant thermal insulation determined on a movable thermal manikin: part II: effects of wind and body movement on local insulation [J]. International Journal of Biometeorology, 2015, 59(10): 1487-1498.
- [8] QIAN X M, FAN J T. Prediction of clothing thermal insulation and moisture vapour resistance of the clothed body walking in wind [J]. Annals of Occupational Hygiene, 2006, 50(8): 833-842.
- [9] 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.
YU Yao, QIAN Xiaoming, FAN Jintu. Effect of wind velocity and walk speed on thermal insulation of clothing[J]. Journal of Textile Research, 2009, 30(8): 107-112.
- [10] NILSSON H, HOLMÉR I, OHLSSON G, et al. Clothing insulation at high wind speed [M]. Sweden: Arbeteoch Hälsa Vetenskaplig Skriftserie, 1998: 114-117.
- [11] HAVENITH G, NILSSON H O. Correction of clothing insulation for movement and wind effects, a meta-analysis [J]. European Journal of Applied Physiology, 2004, 92(6): 636-640.
- [12] 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, DNEG 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.
- [13] 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.
- [14] LU Y H, WANG F M, WAN X F, et al. Clothing resultant thermal insulation determined on a movable thermal manikin: part II: effects of wind and body movement on local insulation [J]. International Journal of Biometeorology, 2015, 59(10): 1487-1498.
- [15] QIAN X M, FAN J T. Interactions of the surface heat and moisture transfer from the human body under varying climatic conditions and walking speeds. [J]. Applied Ergonomics, 2006, 37(6): 685-693.