

DOI:10.13475/j.fzxb.20201005008

# 织物与皮肤动态接触下的湿感觉阈限与强度评价

张昭华<sup>1,2</sup>, 唐香宁<sup>1</sup>, 李俊<sup>1,2</sup>, 李璐瑶<sup>1</sup>

(1. 东华大学 服装与艺术设计学院, 上海 200051;

2. 东华大学 现代服装设计与技术教育部重点试验室, 上海 200051)

**摘要** 为研究织物以不同速度与皮肤动态接触过程中对湿感觉的影响,分析了湿感觉绝对阈限与阈上强度的影响机制。通过向织物内添加定量的水,让受试者应用心理学标尺对湿感觉的阈上强度进行评分;然后通过注射泵向织物持续加水直至受试者感觉到湿,记录此时的加水量为绝对阈限;最后采用温度传感器记录测试皮肤区域的温度变化,计算皮肤冷却率。结果表明:皮肤冷却率与湿感觉阈上强度呈正相关,与绝对阈限呈负相关;湿感觉阈上强度可根据织物的最大瞬态热流量、含水量和摩擦系数进行预测,绝对阈限可根据织物的润湿时间和摩擦系数进行预测;绝对阈限适用于评价皮肤在初始出汗状态下的湿敏感性,在皮肤大量出汗时用阈上强度可更好地评价湿敏感性。

**关键词** 织物;皮肤;动态接触;湿感觉;绝对阈限;阈上强度

中图分类号:TS 941.16 文献标志码:A

## Threshold and intensity evaluation of skin wetness perception under dynamic contact with fabrics

ZHANG Zhaohua<sup>1,2</sup>, TANG Xiangning<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1,2</sup>, LI Luyao<sup>1</sup>

(1. College of Fashion and Design, Donghua University, Shanghai 200051, China; 2. Key Laboratory of Clothing Design and Technology, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 200051, China)

**Abstract** To gain insight into how fabrics affect the perception of wetness under dynamic skin contact at different velocities, the influencing mechanism of absolute threshold and intensity of the perception of wetness were investigated. By applying quantitative amounts of water (low, medium, and high) to each of the testing fabrics, participants reported the intensity of perceived wetness on a psychometric scale. In addition, water was supplied continually with a pump until the threshold of wetness was perceived by the participants. At the same time, the temperature sensors were used to record local skin temperature and calculate skin cooling rate. The results indicate that skin cooling rate has a significant positive correlation with wetness intensity rating, while a negative correlation with absolute threshold. The intensity rating of wetness perception is predicted by the physical parameters of the fabrics, that is maximum transient thermal flow, water content, and friction coefficient, while wetness threshold was predicted by wetting time and coefficient of friction. The threshold detection was qualified to evaluate the sensitivity to wetness at the initial detection of moisture on the skin, while the stimulus intensity rating would give a better prediction at the moisture absorption stage. This study provides the evaluation technology for designing clothing with desirable wetness levels.

**Keywords** fabric; skin; dynamic contact; wetness perception; absolute threshold; intensity rating

感觉环境及皮肤湿度变化对人体的自主生理与行为调节有重要意义,然而人体最大的感觉器官皮

肤并没有专门的湿感受器,而是通过温度感受器及机械感受器响应外界刺激,转化为电信号传递至大

收稿日期:2020-10-26 修回日期:2020-11-30

获奖说明:本文荣获中国纺织工程学会颁发的第21届陈维稷优秀论文奖

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(2232021G-08)

第一作者:张昭华(1977—),女,副教授,博士。主要研究方向为服装舒适性与工效性。E-mail:zhangzhaohua@dhu.edu.cn。

脑进行整合,形成复杂的湿感觉<sup>[1]</sup>。由于皮肤湿感知主要反映人体的心理感觉,通常采用心理物理法研究人体随外界刺激所发生的感受变化情况,一般采用阈限评价和阈上强度评价 2 种形式。

阈限评价反映皮肤感知最小刺激的能力,用于衡量人体皮肤辨别湿润的敏感度,评价指标主要有绝对阈限(AL)、差别阈限(DL)及韦伯分数 3 种<sup>[2]</sup>。Sweeney 等<sup>[3]</sup>采用恒定刺激法,通过向织物中添加水作为物理刺激,结果发现心理湿感知出现的绝对阈限为含湿量 0.024 mL,差别阈限为含湿量 0.039 mL,韦伯分数为 0.43,说明人体皮肤具有较好的湿敏感性。Jeon 等<sup>[4]</sup>也采用恒定刺激法测试了 4 种织物的差别阈限,分别使用标准刺激 0.5 mL 和 1.5 mL 代表低和高出汗率,结果表明织物类型影响差别阈限值,在低刺激(0.5 mL)时棉织物的差别阈限最大,而在高刺激(1.5 mL)时高性能涤纶的差别阈限最大,说明涤纶织物的高芯吸率在高出汗条件下能提供更好的湿舒适性。Bergmann 等<sup>[5]</sup>研究发现,手指与织物静态接触时的韦伯分数在 0.34~0.63 之间,而在动态接触时的韦伯分数为 0.3,说明人体可借助额外的机械刺激来提高湿感知的辨别能力。

测量感觉阈限的目的在于为心理物理函数标定起点,另外还需测量阈上感觉强度,以描述刺激的心理感受和刺激的物理属性之间的关系。在湿感知的强度评价中,需要向织物加水作为物理湿刺激,因此加湿方法会对实验结果造成影响。以往的研究中,向织物加湿的方法主要有定量加湿、动态加湿和干燥等方法。定量加湿是在接触皮肤之前预先向织物加入恒定量的水<sup>[3,6]</sup>,或者根据织物的饱和含水量,以一定的百分比梯度加湿<sup>[7-8]</sup>。由于织物厚度的不同,2 种加湿方法会产生不同的实验结果,Raccuglia<sup>[9]</sup>对比了 2 种加湿方法,结果发现,采用百分比梯度向织物加湿时,由于薄织物的绝对含水量小于厚织物,薄织物比厚织物感觉更干,相反地,当采用恒定量法加水时,由于较薄面料的单位体积相对含水量大于厚面料,导致湿感知较强。动态加湿方法是指在皮肤与织物接触的过程中,动态持续向织物加湿,Tang 等<sup>[10]</sup>应用自动注射泵,控制水流以恒定的速度向织物加湿,直到受试者感觉到湿及粘体感。这种加湿方法可模拟人体初始出汗阶段及真实的着装情况。干燥法指先向织物加入一定量的水,然后干燥不同的时间,研究织物内余留的水量与湿感知之间的关系。Chau 等<sup>[11]</sup>为模拟人体运动后恢复阶段的服装干燥行为,首先向织物加入 1.4 g 的水,然后分别干燥 0, 16, 32, 48, 60 min,称量各时

刻织物的含水量,并评价皮肤的湿感知,建立起织物干燥时间与主观湿感知评分之间的数学关系。可见,不同的加湿方法适用于模拟不同的着装行为及出汗阶段,在具体使用过程中,需充分考虑产品应用的场合与目的。

目前在有关湿感知的研究中,既有应用阈上强度评价方法的,又有应用阈限评价方法的,但由于所采用的实验条件、测试织物、测试部位等均不相同,难以对实验结果进行综合评价。本文将系统探讨皮肤湿感知阈限值与阈上强度的影响机制,从多个维度综合评价皮肤湿感知的影响因素与作用机制。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料

实验选择具有不同纤维类型、组织结构和厚度的 9 种针织物,根据厚度可分为 2 组,即薄型组(0.67~0.75 mm)和厚型组(0.97~1.03 mm)。处于同一组中的织物在厚度与质量上接近,但纤维种类不同。另选取参照织物 1 块,用于主观湿感知评分时的基准,实验织物的具体参数如表 1 所示。

表 1 织物规格参数表

Tab.1 Fabric specification parameters

组别	试样编号	纤维成分	组织	面密度/ ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )	厚度/ mm	透气性/ ( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )
薄型 (0.67~ 0.75 mm)	L1	棉 100%	纬平针	152	0.70	552.85
	L2	麻 100%	纬平针	143	0.72	3 501.85
	L3	涤纶 100%	纬平针	154	0.75	1 508.81
	L4	Coolmax 100%	珠地	148	0.71	936.65
	L5	锦/氨纶 (82/18)	纬平针	164	0.67	1 234.17
厚型 (0.97~ 1.03 mm)	H1	棉 100%	纬平针	224	1.03	457.24
	H2	棉 100%	毛圈	202	1.01	343.16
	H3	涤纶 100%	纬平针	223	0.97	1 040.57
	H4	涤纶 100%	毛圈	221	1.03	1 070.70
参照	R	棉/涤纶 (65/35)	纬平针	181	0.79	1 500.01

所有织物均裁剪成 10 cm×17 cm 大小的试样,并根据 AATCC 135—2015:《家庭洗涤后的织物尺寸变化标准》,每种织物洗涤 3 次,试样使用前至少在人工气候室内放置 24 h。

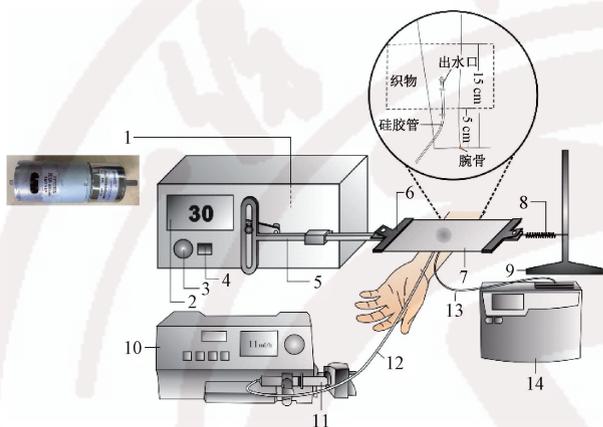
### 1.2 受试者

27 名没有感觉系统及皮肤疾病的女性大学生自愿参加实验,首先进行受试者筛选以保障主观测评的可靠性与稳定性,筛选的方法按照前期研究<sup>[12]</sup>进行。经筛选后,主观湿感知评分一致性较好的 20 名受试者(年龄:( $23.5\pm 2.5$ )岁,身高:( $159.6\pm$

8.2) cm, 体重:  $(52.1 \pm 7.9)$  kg 被挑选出来, 成为实验的最终受试者。

### 1.3 实验装置

设计搭建了动态摩擦装置来模拟皮肤与织物之间的动态接触过程, 包括电动机、调速器、驱动杆及固定装置, 如图 1 所示。测试过程中, 织物由 2 个夹子 (每个 16 g) 夹持, 一端连接到驱动杆上, 另一端与弹簧连接, 弹簧连接到 1 个金属底座上, 并用螺丝固定于桌面上。驱动杆在电动机的控制下可实现水平往复运动, 线速度在  $0 \sim 0.12$  m/s 之间。



1—电动机; 2—速度显示; 3—调速器; 4—电源开关; 5—驱动杆; 6—夹子; 7—织物试样; 8—弹簧; 9—金属底座; 10—注射泵; 11—注射器; 12—硅胶管; 13—受试者皮肤; 14—温度传感器;

图 1 皮肤与织物间动态接触测试设备图

Fig.1 Testing device for dynamic contact between skin and fabric

为模拟皮肤的动态出汗过程, 采用 BYZ-810 型医用注射泵 (通盛易达医用电子设备股份有限公司) 向织物动态加湿, 注射泵驱动注射器按照指定的速率供水, 注射器的出水口连接 1 根硅胶管 (外径为 3 mm), 封闭硅胶管的另一端, 并在距离管端 5 cm 的地方打一个出水孔, 用胶带将硅胶管固定在受试者的测试皮肤处, 使得出水口朝向织物一侧, 当水流时不会直接接触皮肤, 而是先被织物吸收。测试区域的皮肤温度使用 HSRTD-3-100 型铂电阻温度传感器连续监测 (英国 Omega 公司)。

制作 L 形木板 (宽为 50 cm; 长为 73 cm; 高为 43 cm) 放置于受试者与测试装置之间, 避免视觉观测影响评价结果。在木板上挖洞, 使受试者的左前臂可穿过木板并掌心朝上放置于桌面上, 受试者坐在高度可调的椅子上, 实验场景如图 2 所示。

### 1.4 实验条件

所有实验都在人工气候舱内完成, 环境温度为  $(20 \pm 1)$  °C, 相对湿度为  $(65 \pm 5)\%$ , 风速小于 0.3 m/s。



图 2 实验场景图

Fig.2 Experimental setup

#### 1.4.1 接触速度

每种织物试样都在摩擦装置的带动下, 以 3 种速度进行测试, 分别是低速 ( $v_1$ : 30 mm/s), 中速 ( $v_2$ : 60 mm/s) 和高速 ( $v_3$ : 90 mm/s)。

#### 1.4.2 加湿方法

使用室温为  $(20 \pm 1)$  °C 的蒸馏水润湿织物试样, 加水量分为 3 个等级: 低量 0.9 mL ( $L$ ); 中量 1.5 mL ( $M$ ); 高量 2.1 mL ( $H$ )。用 TopPette II 微量注射器 (大龙实验仪器有限公司) 在织物的中心加水, 称量后放入塑料袋中密闭保存, 并在人工气候舱中放置 24 h。在参照试样中加入 50% 的最大饱和含水量, 代表中度湿感觉强度。根据 AATCC 79—2014《纺织品的吸水性》测试参照织物的饱和含水量。

在评价皮肤湿感觉的绝对阈限时, 采用注射泵动态加湿的方法, 控制出水速度为 11 mL/h, 持续向受试者的测试皮肤区域供水, 直到受试者主观感觉到湿为止, 记录此时的加水量。

### 1.5 实验流程

实验共分为 2 个部分: 绝对阈限评价与阈上强度评价。

绝对阈限评价实验中, 每位受试者共需完成 27 次评价 (9 种织物  $\times$  3 种速度), 织物的测试顺序按照随机数排序, 测试流程为: 1) 受试者进入气候舱后静坐 20 min 适应环境条件, 期间练习使用评价标尺; 2) 受试者坐于实验桌前, 将左前臂掌心朝上放置于实验桌上, 用酒精擦拭皮肤, 并用记号笔标记测试区域, 即距离腕骨 5 cm 和 10 cm 的皮肤区域; 3) 使用医用胶带 (3M 公司) 将注射泵的硅胶管与温度传感器固定在距离腕骨 7.5 cm 的皮肤上, 保证硅胶管的出水口朝向织物, 并将温度传感器与 Squirrel S2020 数据记录仪连接 (英国 Grant Instruments 有限公司), 每隔 30 s 检测皮肤温度, 直到 2 次测试皮肤温度之间的差值小于 2%, 记录此时的皮肤温度为基准皮肤温度  $t_0$ ; 4) 将织物试样反面朝向皮肤放置于测试皮肤区域, 与摩擦控制装置相连, 设置 1 种摩

擦速度( $v_1$ 、 $v_2$ 、 $v_3$ )拖拽织物开始往复运动,打开注射泵同时用秒表记录时间,直到受试者口头报告感觉到了湿,立即停止计时,记录此时的皮肤温度 $t_1$ ,关闭注射泵;5)取下织物试样,用干纸巾轻轻擦拭皮肤上残留的水分,在开始下一次测试前,应确保测试皮肤温度恢复到基准温度的 2% 范围内。重复上述实验过程,直到完成所有待测织物,每位受试者访问实验室 3 次,每次测试 1 种摩擦速度。

阈上强度评价实验中,每位受试者共需完成 81 次评价(9 种织物×3 种速度×3 种加水量)。实验流程与绝对阈限实验类似,不同的是采用了预先加湿织物的方法,而不是通过注射泵供水。首先将参照织物放置于测试皮肤上,选择一种速度并摩擦 10 s 后停止,告知受试者参照织物的湿感觉评分为 5,在随后的测试中可与参照织物相比较进行评分。取下参照织物,轻轻擦拭皮肤残留水分,待皮肤温度恢复到基准温度的 2% 时,随机选择一块测试湿织物,摩擦 10 s 后,取下织物并立即记录此时的皮肤温度( $t_1$ ),同时要求受试者在 5 s 内给出湿感觉评分。重复上述实验过程,直到完成所有待测织物,每位受试者访问实验室 3 次,每次测试一种摩擦速度。

## 1.6 测试指标

### 1.6.1 液态水管理性能测试

应用 MMT 织物湿管理测试仪(英国 SDL Atlas 公司),根据 AATCC 195—2009《织物液态水管理性能》,对织物试样的液态水传递性能进行测试,每种织物裁剪 3 块测试。织物的润湿时间较短,扩散速度较快,吸水速率与润湿半径较大,则具有较好的湿传递性能。

### 1.6.2 织物风格测试

应用 KES-FB4 织物风格仪(日本 Kato Tech 有限公司)测试织物的表面粗糙度(SMD)和摩擦因数( $M_F$ ),较大的 SMD 值表示表面粗糙,较高的摩擦因数表示摩擦阻力大。应用 KES-F7 热传导仪,测试织物的瞬态最大热流量( $Q_{max}$ ),表示织物与皮肤接触瞬间所传递的热流量。所有织物试样均在干态与湿态(含水量为低(L)、中(M)、高(H))下测试各项展面指标,每种织物裁剪 3 块测试。

### 1.6.3 皮肤冷却率测试

测量受试者的局部皮肤在湿织物刺激前后的皮肤温度,根据下式计算测试皮肤区域的冷却率:

$$\Delta t_{sk} = (t_2 - t_1) / \theta \quad (1)$$

式中: $\Delta t_{sk}$ 为局部皮肤冷却率 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ;  $t_1$ 为施加湿织物刺激前的初始皮肤温度 $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_2$ 为施加湿织物刺激后的皮肤温度 $^{\circ}\text{C}$ ;  $\theta$ 为施加刺激的时间,阈上强度测

试为 10 s。

### 1.6.4 湿感觉的绝对阈限测试

湿感觉的绝对阈限是指触发受试者初始感觉到湿时所需的供水量,由注射泵的注射速度与时长计算得到:

$$\rho_w = \frac{\theta_w}{3600} \times v_w \quad (2)$$

式中: $\rho_w$ 为触发湿感觉所需的水量,即湿感觉绝对阈限 mL;  $v_w$ 为供水速度(11 mL/h);  $\theta_w$ 为受试者感觉到湿所需要的时间 s。

### 1.6.5 湿感觉的阈上强度测试

采用视觉模拟标尺评价皮肤湿感觉的强度,如图 3 所示。湿感觉评分从 1(最弱)到 9(最强),受试者可以在标尺上的任意位置标记(精度 0.1),每种织物试样的评分通过与参照织物(评分 5)比较得出。

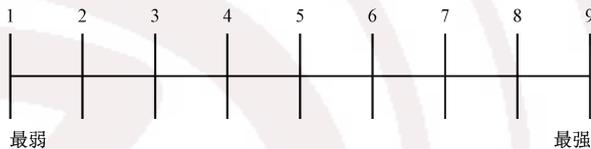


图 3 湿感觉评分标尺

Fig.3 Wetness rating scale

## 1.7 数据分析

在阈上强度实验中,自变量为织物类型(9 水平)、摩擦速度(3 水平: $v_1$ 、 $v_2$ 、 $v_3$ )和含水量(3 水平:L、M、H),因变量包括皮肤冷却率和主观湿感觉评分。采用三因素重复测量方差分析,考察自变量对皮肤冷却率和湿感觉评分的影响,若发现显著性影响,则进一步进行邦弗朗尼多重比较。

在绝对阈限实验中,自变量为织物类型(9 水平)和摩擦速度(3 水平: $v_1$ 、 $v_2$ 、 $v_3$ ),因变量为皮肤冷却率和绝对阈限。应用双因素重复测量方差分析,考察自变量对皮肤冷却率和绝对阈限的影响。

应用皮尔逊相关性分析计算湿感觉阈上强度、绝对阈限与织物客观物理参数之间的相关系数。应用多元逐步回归分析,建立根据客观参数(皮肤冷却率、织物的表面性能指标、湿传递性能指标)预测皮肤湿感觉绝对阈限与阈上强度的数学模型。统计分析采用 SPSS 24 软件,显著性水平设为  $p < 0.05$ 。

## 2 实验结果

### 2.1 湿感觉的绝对阈限

各织物试样的湿感觉绝对阈限测试结果如图 4 所示。结果表明,织物类型对触发湿感觉所需的供

水量(绝对阈限)有显著影响[ $F(6.7, 144) = 6.03$ ,  $p < 0.001$ ], 摩擦速度没有显著影响。织物 L5 比织物 L4 与 L1 有显著更低的绝对阈限( $p < 0.05$ ), 说明 L5 比其他织物更易触发湿感觉。

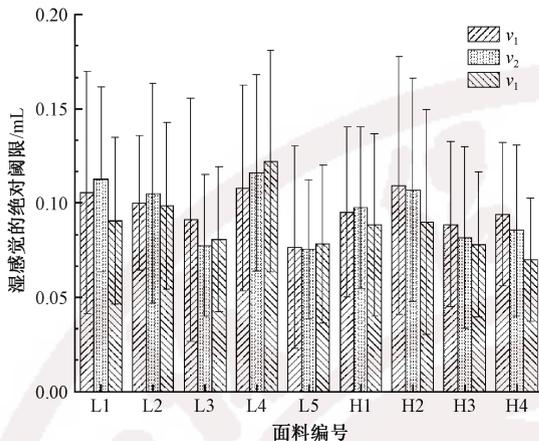


图4 织物在3种摩擦速度下的湿感觉绝对阈限

Fig.4 Absolute threshold of wetness perception of fabrics at three velocities

皮肤冷却率与绝对阈限之间呈显著的负相关性( $r = -0.585$ ,  $p = 0.001$ ), 说明当皮肤冷却率越大时, 湿感觉的绝对阈限越低, 皮肤湿感觉阈限在 0.08~0.13 mL 水之间, 对应于皮肤冷却率在 0.03~0.06  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  之间。

织物的湿传递性能(MMT测试)与湿感觉绝对阈限之间的相关分析表明, 润湿时间与湿感觉的绝对阈限之间有显著的负相关性( $r = -0.70$ ,  $p = 0.037$ ), 而水的扩散速度与绝对阈限之间有显著的正相关性( $r = 0.69$ ,  $p = 0.04$ )。

织物的表面性能(KES测试)与湿感觉绝对阈限之间的相关分析表明, 绝对阈限与摩擦因数( $M$ )之间有显著的正相关性( $r = 0.746$ ,  $p = 0.004$ ), 而与几何粗糙度(SMD)之间没有显著相关性( $r = -0.027$ ,  $p = 0.946$ )。

应用多元逐步回归分析建立湿感觉绝对阈限的回归方程。当把皮肤冷却率、织物的物理参数(润湿时间、扩散速度、粗糙度、摩擦因数、织物厚度)与摩擦速度一起作为自变量代入后, 可得到湿感觉绝对阈限的预测方程( $r^2 = 0.67$ ,  $p = 0.004$ ):

$$\rho_w = 0.07 + 0.129M_F - 0.76\Delta t_{sk} \quad (3)$$

式中: $M_F$ 为摩擦因数(MIU), 是主要影响因子, 解释了总方差的56%, 皮肤冷却率 $\Delta t_{sk}$  ( $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ )是次要影响因子, 解释了总方差的11%。

当用织物的最大热流量( $Q_{\max}$ )代替皮肤冷却率作为自变量时, 可得到另一个预测方程( $r^2 = 0.702$ ,  $p < 0.001$ ):

$$\rho_w = 0.085 + 0.102M_F - 0.003\theta_w \quad (4)$$

式中: $M_F$ 为主要的因子, 解释了总方差的51%; $\theta_w$ 为润湿时间s, 为次要影响因子, 解释了总方差的19.2%, 而 $Q_{\max}$ 未进入模型。

2个回归模型(式(3)和式(4))都可预测湿感觉绝对阈限, 但从实际应用角度来看, 式(4)建立在织物的客观物理参数上, 可用仪器方便地进行测试, 而式(3)使用了皮肤温度, 需通过复杂人体实验得到。

## 2.2 湿感觉的阈上强度

每种织物在3种含水量与3种摩擦速度下, 与测试皮肤区域接触时的主观湿感觉评分如图5所示。三因素重复测量方差分析表明, 织物类型对皮肤湿感觉有显著影响[ $F(7.3, 1301.9) = 53.7$ ,  $p < 0.001$ ], 含水量有显著影响[ $F(1.9, 1066.3) = 99.5$ ,  $p < 0.001$ ], 摩擦速度也有显著影响[ $F(1.9, 1065.5) = 8.5$ ,  $p < 0.001$ ]。

进一步应用多重比较发现, 湿感觉评分随着含水量从L增加到H而逐渐增强( $p < 0.001$ )。摩擦速度 $v_1$ 比 $v_2$ 和 $v_3$ 有显著更高的湿评分( $p < 0.01$ ), 但 $v_2$ 与 $v_3$ 之间没有显著差异( $p = 1.0$ )。另外, 织物类型与含水量之间有显著的交互作用[ $F(11.9, 706.2) = 2.23$ ,  $p = 0.01$ ], 只有织物L4的不同含水量(L、M、H)对湿评分没有显著影响( $p > 0.05$ ), 说明Coolmax® 织物在人体高出汗率的情况下有助于降低皮肤的湿感觉。

相关分析结果表明, 皮肤冷却率与湿感觉评分之间呈显著的正相关性( $r = 0.72$ ,  $p < 0.001$ ), 皮肤冷却率越大则湿评分越高。另外, 湿评分与织物的最大瞬态热流量( $Q_{\max}$ )也呈显著的正相关性( $r = 0.879$ ,  $p < 0.001$ )。织物的湿传递与表面性能影响皮肤湿感觉, 皮肤湿感觉评分与织物的吸水速率呈显著的负相关性( $r = -0.69$ ,  $p < 0.001$ ), 与扩散速度呈显著的负相关性( $r = -0.55$ ,  $p < 0.001$ )。另外, 织物的摩擦因数( $M_F$ )与湿感觉评分有显著的正相关性( $r = 0.26$ ,  $p = 0.018$ ), 而与粗糙度(SMD)之间的相关性不显著( $r = -0.01$ ,  $p = 0.93$ )。

作为人体的生理指标, 皮肤冷却率可以反映从皮肤到织物所传递的热流量, 当把皮肤冷却率与织物的物理参数, 包括吸水速率、扩散速度、粗糙度(SMD)、摩擦因数( $M_F$ )、摩擦速度等一起作为自变量代入多元逐步回归分析, 可得到皮肤湿感觉评分的预测方程( $r^2 = 0.74$ ,  $p < 0.01$ ):

$$R = -0.73 + 32.71\Delta t_{sk} + 3.92M_F - 0.009S \quad (5)$$

式中: $R$ 为湿感觉评分值; $S$ 为吸水速率, %/s;  $\Delta t_{sk}$ 皮肤冷却率( $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ )为主要影响因子, 解释了总方差的62%, 而摩擦因数和吸水速率是次要因子, 二者

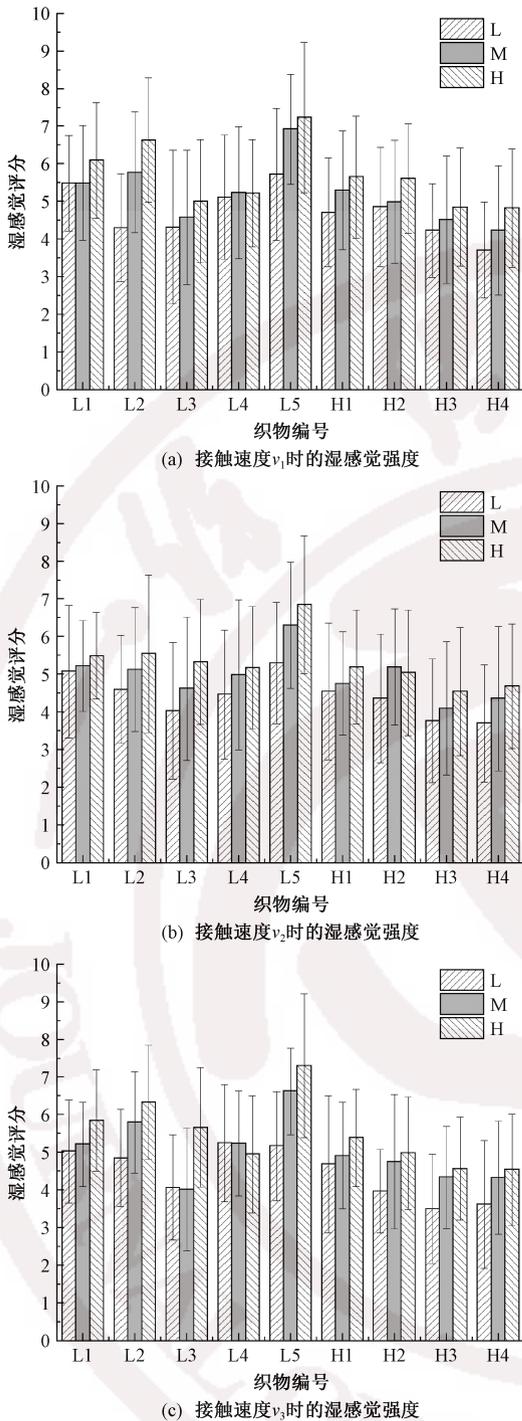


图 5 织物在不同含水量下的湿感觉强度

Fig.5 Wetness perception rating of each fabric under different water contents at contacting velocity of  $V_1$ (a);  $V_2$ (b) and  $V_3$ (c)

共同解释了总方差的 12%。

如前所述,皮肤冷却率的测试需进行人体实验,该参数较难采集,因此用织物的导热性能  $Q_{\max}$  与含水量代替皮肤冷却率,重新代入多元逐步回归分析,得到另一个预测方程( $r^2=0.86, p<0.001$ ):

$$R = 1.798 + 17.414Q_{\max} + 0.807C + 3.798M_F - 0.015S - 0.293v - 0.003v_m \quad (6)$$

式中: $Q_{\max}$ 为瞬态最大热流量,  $W/m^2$ ;  $C$ 为含水量,  $g$ ;  $v$ 为水扩散速度,  $m/s$ ;  $v_m$ 为摩擦速度,  $m/s$ ; 摩擦因数  $M_F$  是主要的影响因子,解释了总方差的 82%; 虽然吸水速率、扩散速度与摩擦速度也进入了模型,但影响较小,总共解释了总方差的 4%,因此也可以将模型简化为

$$R = 1.798 + 17.414Q_{\max} + 0.807C + 3.798M_F \quad (7)$$

### 3 讨论分析

#### 3.1 热传递作用的影响

本文研究证实了较高的皮肤冷却率会引起较强的湿感觉,并更易使人感觉到湿,这与文献[13-14]的研究一致,即较高的湿感觉评分与较高的皮肤温度下降率有关。

在湿感觉的阈上强度实验中发现,织物的瞬态热流量( $Q_{\max}$ )对湿感觉评分有显著影响,而在绝对阈限评价中,未发现  $Q_{\max}$  的显著作用。造成这种不一致的主要原因是,在强度评分实验中,织物的加水量(最小 0.9 mL)较大,而在阈限评价实验中织物的加水量仅为 0.08~0.13 mL。由于较少的含水量不足以引起织物导热性能之间的差异,  $Q_{\max}$  未能成为湿感觉绝对阈限的影响因子。

除热传递性能外,织物的液态水传递性能影响皮肤湿感觉。在用仪器测试的各种水传递性能中,织物的吸水速率、水扩散速度越快,则湿感觉阈上强度评分越低。相应地,织物的水扩散速度越快、润湿时间越短,则人体需要更长的时间感觉到湿,即湿感觉的绝对阈限越高。

在定量的湿刺激下,湿感觉强度评分越高的织物说明湿敏感性越好;相反地,引起可察觉湿感觉所需的加水量越小则湿敏感性越好。为比较织物在阈上强度评分与绝对阈限实验中的湿敏感性差异,将湿感觉的绝对阈限取反( $\rho$ ),即较小的值代表较低的敏感性,如下式所示:

$$\rho = -\rho_w \quad (8)$$

2种湿敏感性评价方法之间的比较如图6所示。3种涤纶织物(L3, H3, H4)的湿敏感性在阈上强度评价中最小,而在绝对阈限评价中最大。根据织物的水传递性能测试结果,这3种织物的吸水与润湿速度比其他织物要差,水滴不能在短时间内被织物吸收,导致水与皮肤直接接触,因此在阈限评价中有更高的敏感性。

进一步发现,湿感觉预测式(4)与式(7)之间的差异,在湿感觉绝对阈限回归式(4)中,润湿时间替代了阈上强度回归方程式(5)中的  $Q_{\max}$

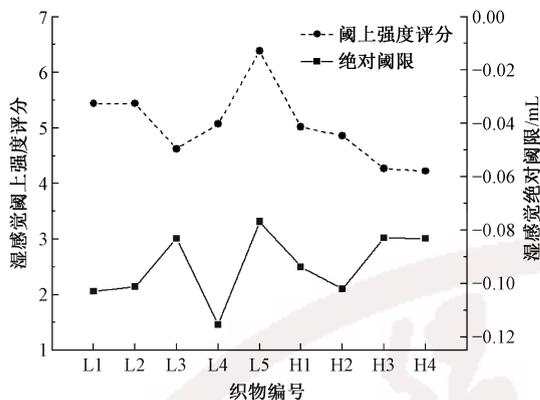


图6 湿感觉评分与绝对阈限之间的比较

Fig.6 Comparison between wetness rating and wetness threshold detection

和含水量成为主要影响因子。说明在阈限评价实验中,织物的湿传递性能发挥着更重要的作用,而在阈上强度评价实验中,湿织物的热传递性能起主要作用,由于含水量与  $Q_{\max}$  值之间的正相关性,织物吸收的水越多,  $Q_{\max}$  值越大,从而导致了更大的湿感觉评分。在皮肤初始出汗阶段,织物的湿传递性能对湿感知起关键作用,随着织物内吸水量的增加,湿织物的热传递性能对湿感觉强度发挥显著作用。

### 3.2 机械刺激作用的影响

前人研究了皮肤与织物动态接触对湿感觉的影响<sup>[9-10]</sup>,然而有关接触速度的影响机制未见相关报导。本研究虽然没有发现接触速度对湿感觉绝对阈限的影响,但在阈上强度的评价中,较低的接触速度造成显著更强的湿感觉。导致这种不一致的可能原因是,在绝对阈限实验中,水从硅胶管中滴出并首先在织物一侧扩散,没有直接与皮肤接触,因此在较短的测试时间内,接触速度对水扩散能力的影响是微不足道的。

无论是绝对阈限还是阈上强度评价都发现摩擦因数对湿感觉的显著影响。在绝对阈限预测模型式(4)中,织物的摩擦因数解释了总方差的59%,表明在皮肤初始出汗时,织物较干燥,此时织物的表面材质特性是影响湿敏感性的主要因子。这与文献<sup>[15]</sup>的研究一致,即当冷刺激缺失时,人体主要靠机械刺激信号来察觉到湿。随着出汗量的增加,织物内逐渐吸收水分,此时湿织物的热传递性能取代表面材质性能成为皮肤湿敏感性的主要预测因子,正如阈上强度模型式(7)所示的那样,摩擦因数仅解释了总方差的5%,而  $Q_{\max}$  解释了总方差的54%。因此,不同的回归模型适用于预测皮肤不同出汗阶段的湿感觉。

## 4 结论

本文探讨了当皮肤与织物动态接触时,织物类型、含水量和接触速度对湿感觉绝对阈限与阈上强度的影响。发现织物类型影响湿感觉,触发人体可察觉湿感觉的含水量在0.08~0.13 mL之间,在各种仪器测量的水传递性能中,具有较快扩散速度与较低吸水率的织物湿感觉较弱。

织物的表面性能影响湿感觉,在初始出汗阶段,织物相对干燥,此时织物的摩擦因数是影响湿感觉的主要因素,其次是润湿时间。随着出汗量的增加,织物吸水量增大,此时织物的热传递指数( $Q_{\max}$ )成为影响湿感觉的主要因素,其次是摩擦因数。表明模拟皮肤从干燥到出汗的动态过程中,在不同的出汗阶段,湿感觉的主要影响因素存在差异。

本文系统评价了皮肤与织物动态接触下,湿刺激与机械刺激对皮肤湿感觉的影响,为改善运动服、休闲服及健康医疗类产品的湿舒适感觉提供了测试技术与评价方法。实验使用室温下的蒸馏水,与实际汗液的成分及温度之间可能存在差异,另外,受试者均为女性,有关性别之间的差异未做探讨。在未来的研究中,当人体在热环境中运动出汗时,服装设计因素(合体性、通风性、开口)对湿感觉的影响值需进一步深入探讨。

FZXB

### 参考文献:

- [1] DRIVER Jon, SPENCE Charles. Multisensory perception: beyond modularity and convergence [J]. *Current Biology*, 2000, 10(20): 731-735.
- [2] GERRETT Nicola, OUZZAHRA Yacine, COLEBY Samantha, et al. Thermal sensitivity to warmth during rest and exercise: a sex comparison [J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2014, 114(7): 1451-1462.
- [3] SWEENEY Maureen M, BRANSON Donna H. Sensorial comfort: part I: a psychophysical method for assessing moisture sensation in clothing [J]. *Textile Research Journal*, 1990, 60(7): 371-377.
- [4] JEON Eunkyung, YOO Shinjung, KIM Eunae. Psychophysical determination of moisture perception in high-performance shirt fabrics in relation to sweating level [J]. *Ergonomics*, 2011, 54(6): 576-586.
- [5] TIEST Wouter M Bergmann, KOSTERS N Dolfine, KAPPERS Astrid M L, et al. Haptic perception of wetness [J]. *Acta Psychologica*, 2012, 141(2): 159-163.
- [6] FILINGERI Davide, REDORTIER Bernard, HODDER Simon, et al. The role of decreasing contact temperatures and skin cooling in the perception of skin

