

逆温差条件下织物热湿舒适性的测试与研究

姚 穆 李 毅 李顺东 施楣梧

(西北纺织工学院)

【提要】 本文研究在环境温度高于人体体表温度(称逆温差)条件下,服装用织物的热湿舒适性性能,提出使用当量热阻、热阻、湿阻,以及透气率作为在此条件下织物的热湿舒适性物理指标,指出了在此条件下它们的特殊含义。并且用织物微气候仪对此条件下七种织物的热湿舒适性指标进行了测试,与对比穿着试验的结果进行了分析,得出了一些初步规律。

一、引 言

织物的热湿舒适性愈来愈成为人们重视的服用性能。在文献^[1]里,作者之一探讨了在环境温度比人体表面温度低的条件下(称顺温差条件),衣着用织物的热湿舒适性物理指标及其测试方法,并介绍了织物微气候仪。现在大部分有关文章都着重探讨在此顺温差条件下服装的舒适性^[2],对环境温度高于人体体表温度(称逆温差)条件下服装的热湿舒适性探讨较少。虽然,目前不少学者集中精力研究热舒适性的综合指标,但在基础指标尚未研究清楚以前,综合性指标的研究将会受到极大的局限性。因此,本文着重研讨的仍是基础性指标。

本文着重探讨在逆温差条件下服装用织物的热湿舒适性,通过理论分析提出了四个指标作为织物在此条件下的热湿舒适性物理指标。为了寻找这些指标与人体在逆温差条件下热湿舒适感觉的关系,设计并进行了对比穿着试验。对测出的物理指标与穿着试验结果进行了统计分析,提出了一些初步结论。

二、逆温差条件下织物的热湿舒适性物理指标

在逆温差条件下,人体通过服装与环境

的热交换过程是一个很复杂的过程。在理论上,环境温度比人体表面温度高,由温度梯度直接引起的能量流——显热流应该由服装外面向里面流动。此时,人体多余热量的散逸只有通过大量出汗,由汗液在体表附近蒸发,吸收大量蒸发潜热并扩散湿流来实现。这时显热流与潜热流的方向是相反的。决定服装热湿舒适感觉的最直接因素是总热流的大小和方向。总热流为显热流与潜热流的代数和。总热流为正表示与温度梯度方向一致,热流向里,人体热量非但不能散逸至周围空间,反而会不断积聚,使体温升高;总热流为负表示总热流方向与温度梯度方向相反,热流向外,人体可以散逸一些热量至周围空间。同时出汗量较大时汗液散逸速度对穿着湿态舒适性也有影响。一般说来,由于夏季服装比较轻薄稀疏,人体暴露部位较多,有利于藉对流来加强汗气的扩散。所以可以直观地想到织物的透气性能对于服装的热湿舒适性将有明显的影响。由此可见,织物的热阻、湿阻、当量热阻及透气率将是逆温差条件下织物热湿舒适性的部分重要指标。它们分别定义为^[1]:

$$\text{热阻: } R_t = \Delta T / q (\text{°C/瓦});$$

$$\text{湿阻: } R_w = \Delta C / w (\text{秒/米}^3);$$

收稿日期: 1985年8月13日。

当量热阻: $R_e = \Delta T / q_e$ (°C/瓦);

透气率: $B_p = V / AT$ (升/米²·秒)^[3]。

式中: $\Delta T = T_i - T_w$ ——织物内外表面间的温差(°C);

q ——通过织物有效传热面的显热流(瓦);

ΔC ——织物内外表面间的水蒸汽浓度差(千克/米³);

\dot{m}_w ——通过织物有效传湿面积的湿流(千克/秒);

$q_e = q - h_{p0} \dot{r}_w$ ——通过织物有效传热传湿面积的总热流(瓦);

h_{p0} ——水在皮肤表面温度条件下的蒸发潜热(焦耳/千克);

A ——织物有效透气面积(米²);

V ——在 t 秒时间通过织物的空气量(升)。

值得注意的是,此时总热流 $q_e = q - h_{p0} \dot{r}_w$ 与顺温差条件下 $q_e = q + h_{p0} \dot{r}_w$ 不同,因此当量热阻的概念有所不同。在逆温差条件下,由于潜热流一般大于显热流,所以总热流 q_e 将为负,从而当量热阻亦为负值。这个负号表示服装(或织物)对逆温度梯度传热的阻力,而其大小就表示这种阻力的大小。

三、测试方法

逆温差条件下织物的热阻、湿阻及当量热阻仍用织物微气候仪进行测试,只是测试方法有所不同。测试时将恒温恒湿室控制在较高的温度条件下(例如36°C),在微气候仪中的盛水器中放入一定量的蒸馏水,记录下初始水温(T_1)和水量(G)。放上试样及测头,让其平衡一定的时间(t)(几个小时)后,测出水温(T_2)、织物内外温度场和湿度场,以及这些时间内所蒸发出去的水量(ΔG)。然后计算:使水温升高的显热流 $q_1 = G \cdot C(T_2 - T_1)$ (瓦),式中: C 为水的比热,通过织物的平均湿流量 $\dot{r}_w = \Delta G / t$ (千克/秒),潜热流量 $q_w = h_{p0} \cdot \dot{r}_w$ (瓦);总的显热流量 $q = q_1 + q_w$;

总热流量 $q_e = q_1 - q_w$ 。最后结合织物上下表面的温度差、水蒸汽浓度差,根据前面定义式计算出织物的热阻、湿阻和当量热阻。

织物透气率的测试方法按中华人民共和国国家标准——织物透气性试验方法(送审稿)进行。

四、织物的规格及测试结果

所测试的织物规格参数及热阻、湿阻、当量热阻及透气率测试结果列入表1。

五、穿着试验

逆温差条件下的服装穿着试验与文献[1]中的方法较接近,但实验条件有所不同。实验室控制在温度 $38 \pm 1^\circ\text{C}$,相对湿度 $38 \pm 2\%$ 。五位受试者为20~27岁的男性青年。在此环境条件下适应一段时间后,按一定的实验顺序依次穿着由七种材料(同表1)制成的服装,每一种服装穿上后,试验者蹬踏自行车3分钟,作俯卧撑五次之后,静坐平衡半小时,测试记录胸部皮表温度、实验室温度及相对湿度,并分项记录下各自该时刻的各种与热湿舒适性有关的感觉:热、闷、冷、凉、出汗、粘、扎、刺、腻、板等。每一种感觉分为五个等级:无感觉、微感、中等感觉、较强感、很强感觉。在实验中要求受试人员在按随机顺序穿着测试所有服装后,根据自己的记录和综合印象,相对比较每种服装的热湿舒适次序。在综合评价时,要求受试人员根据热感、冷感、闷感、出汗感、凉感等热湿感觉进行表述,排除粘、扎、刺等接触感觉的影响。最后将所有受试人员所排出的舒适次序进行加权平均,得到一个综合性的热湿舒适分数。将接近逆温差条件温度范围的多次穿着试验结果综合以后,得到各种织物的热湿舒适分数如表2所示。

六、试验结果分析

1. 热阻、湿阻与舒适分数的关系

表1 织物的规格及测试结果

试样	材料	厚度 (毫米)	重量 (克/厘米 ²)	组织	颜色	容重 (克/厘米 ³)	填充率 (%)	热阻 (℃/瓦)	湿阻 (秒/米 ³)	当量热阻 (℃/瓦)	透气率 (升/米 ² 秒)
3636纯麻布	苧麻	0.627	0.0117	平纹	白	0.186	12.0	0.390	1.456×10 ⁴	-0.752	0.3949
人造丝软缎	粘胶	0.324	0.0087	缎纹	白	0.269	17.8	0.441	1.310×10 ⁴	-1.534	0.1959
171麻棉布	苧麻, 棉	1.055	0.0212	平纹	白	0.201	13.1	0.435	2.203×10 ⁴	-1.967	0.1729
真丝双绉	桑蚕丝	0.389	0.0714	平纹	白	0.183	13.6	0.346	1.276×10 ⁴	-0.983	0.3409
涤纶哔叽	涤纶	0.605	0.0129	斜纹	白	0.214	15.5	0.623	2.326×10 ⁴	-2.105	0.0917
21×19平布	棉	1.123	0.0154	平纹	白	0.137	8.9	0.498	1.856×10 ⁴	-1.975	0.0756
灰色毛花呢	羊毛	0.702	0.0199	平纹	浅灰	0.283	21.4	0.425	1.373×10 ⁴	-1.212	0.2681

注：填充率是织物中纤维的体积占织物外包围面内体积的百分数。

表2 织物试样的热湿舒适分数

衣料品种	苧麻	蚕丝	羊毛	粘胶	棉	棉/苧麻	涤纶
舒适分数 x	2.15	2.38	2.38	3.60	4.28	4.80	6.63
热湿舒适性	好 → 差						

热阻与舒适分数、湿阻与舒适分数的相关图分别见图1和2。

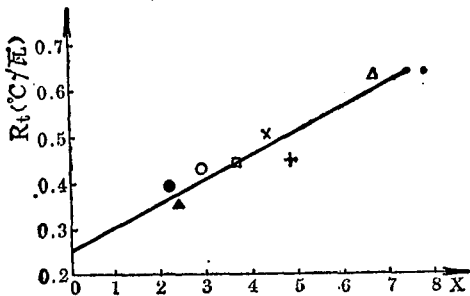


图1 热阻 R_t 与舒适分数 x 相关图

●—苧麻；▲—蚕丝；○—羊毛；
□—粘胶；×—棉；+—棉/苧麻；
△—涤纶(以下各图皆同)。

其回归方程为：

热阻 R_t 与 x ：

$$R_t = 0.0517x + 0.254 \quad (1)$$

$$\text{相关系数 } r = 0.91457 \quad (1')$$

湿阻 R_w 与 x ：

$$R_w = (0.251x + 0.727) \times 10^4 \quad (2)$$

$$\text{相关系数 } r = 0.89234 \quad (2')$$

由图1、图2及方程可以看到：同顺温差条件下的情况^[1]类似，热阻、湿阻与热舒适分数成线性相关。热阻、湿阻愈大，穿着的

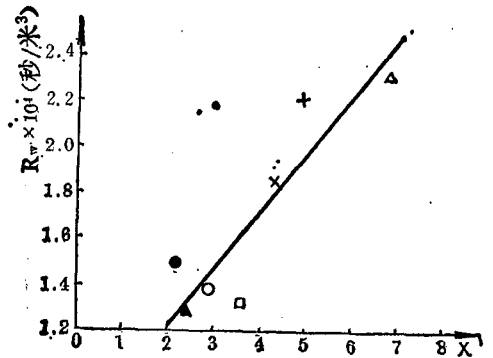


图2 湿阻 R_w 与舒适分数 x 相关图

热湿舒适感愈差，而且热阻与 x 的相关系数比湿阻与 x 的相关系数要高。而在纯理论上，由于逆温差条件下显热流应从服装外向人体流动，热阻似乎应愈大愈好，才能更有效地阻止显热流的流入。这与实验结果似乎相矛盾。这个问题我们是这样考虑的：尽管从理论观点来看，在逆温差条件下，服装的热阻愈大，湿阻愈小，其热湿舒适性愈好。但实际上一般纺织材料，或至少从我们这次所采用的织物来说，其热阻与湿阻不是相互独立的，而是有相互关系的。从图3可以看到，热阻与湿阻是呈线性关系的，热阻愈大，其湿阻愈大。尽管在织物中显热传递过程与水蒸汽传递过程在机理上是不相同的，但它们都与织物中空气的对流状态有关，即传导传热与对流传热和分子扩散传湿与对流传湿是正相关的。

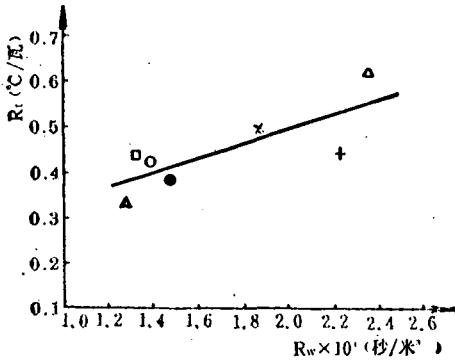


图3 热阻 R_t 与湿阻 R_w 相关图

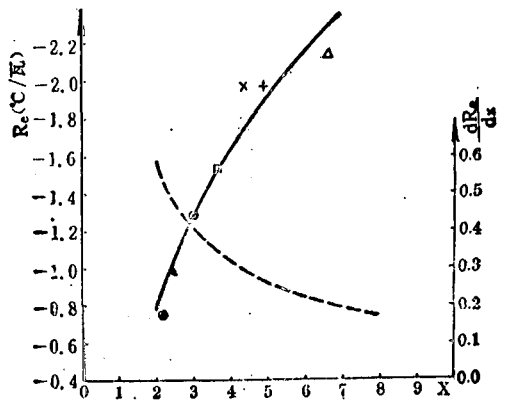


图4 当量热阻 R_e 与舒适分数 x 相关图

2. 当量热阻与舒适分数的关系

当量热阻与舒适分数 x 的相关性见图4。

其回归方程为：

$$R_e = 11.231 \times x^{1/10} - 11.255 \quad (3)$$

$$\text{相关系数 } r = 0.96334 \quad (3')$$

由图4可见，当量热阻与舒适分数有很好的相关性。但其回归曲线不是一条直线而是一条幂函数曲线。这条幂函数曲线的分曲线为 $dR_e/dx = 1.1231x^{-9/10}$ ，见图4中虚线构成的曲线。该微分曲线随 x 的增大而向下。因而该 $R_e - x$ 幂函数曲线的物理意义为：在不同的舒适域内人体感觉的灵敏度不相同，愈靠近不舒适的极端状态，感觉灵敏度愈低，愈接近舒适区域感觉灵敏度愈高。

3. 透气性与舒适分数的关系

透气性与舒适分数 x 的相关图见图5。

其回归方程为：

$$B_p = 0.99557x^{-1} - 0.079793 \quad (4)$$

$$\text{相关系数 } r = 0.94962 \quad (4')$$

由此可见，透气率成为仅低于当量热阻的与舒适分数相关非常密切的物理参数。 $B_p - x$ 曲线为一条负幂函数曲线，织物的透气性愈好，其热湿舒适性愈好。 $B_p - x$ 曲线的微分曲线为 $dB_p/dx = -0.99557x^{-2}$ ， $|dB_p/dx|$ 曲线见图5中虚线构成的曲线。随 x 的增大， $|dB_p/dx|$ 变小。因此，与 $R_e - x$ 曲线类似， $B_p - x$ 曲线表明在不同的感觉区域，人体的热湿舒适感觉有不同的灵敏度。在织物

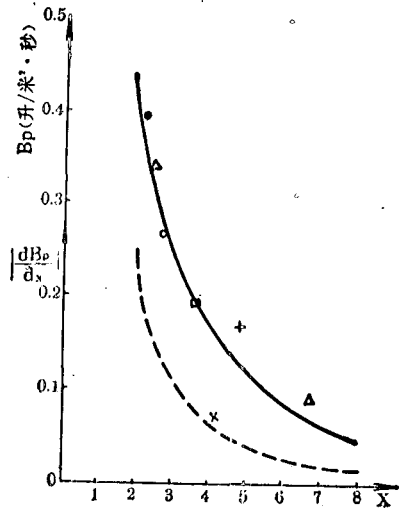


图5 透气率与舒适分数 x 相关图

透气性较好，热湿舒适性较好时，人体感觉灵敏度较高。而当织物透气性较差，热湿舒适性较差时，人体感觉灵敏度也较低。

值得注意的是当量热阻与透气率的关系。如图6所示，织物的当量热阻与透气率成线性负相关 ($B_p = 0.5489 - 0.21878R_e$)，相关系数 $r = -0.96863$ 。可以推测，在此条件下织物的传热传湿过程中，织物的透气性已成为一个非常重要的因素。

七、结 语

本文研究了逆温差条件下织物热湿舒适

性的测试与指标。从实验结果来看,利用织物微气候仪及透气量仪配合测试逆温差下织物的热湿舒适性是比较成功的。所测试的指标能较好地反映织物的热湿舒适性。

从实验分析情况来看,同顺温差条件一样当量热阻能很好地反映逆温差条件下织物的热湿舒适性。它综合了热阻、湿阻的影响;并与透气率有直接而密切的相关,因而是一种带综合性的指标。

透气性在逆温差条件下已成为织物热湿舒适性的一个关键性指标,因而与当量热阻成密切的线性关系。

按实验结果,织物的热阻似乎与服装穿着热湿舒适性的关系就在逆温差条件下也比湿阻与服装热湿舒适性的关系更为密切,但由于热阻与湿阻的相互依赖性,以及传热传湿过程的交叉效应,这个现象的机理还很难作出明确判断,需要进一步的探讨。

本文在研究过程中得到王晓东、高建中等同志及西北纺织院纺材教研组其他同志的热忱支持,在此表示感谢。

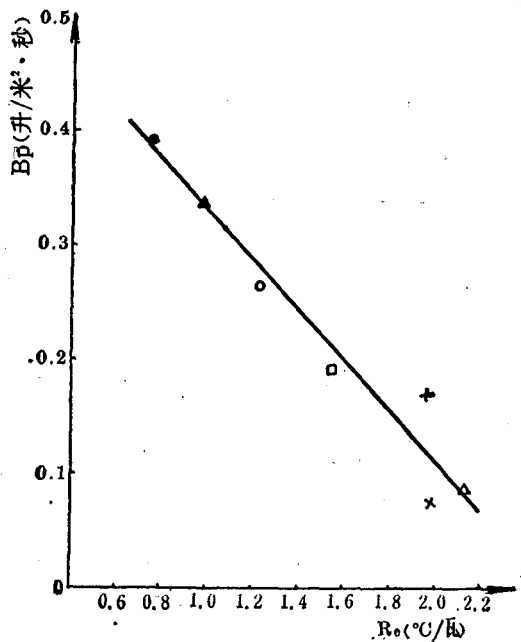


图6 透气率 B_p 与当量热阻 R_e 相关图

参 考 资 料

- [1] 《纺织学报》, 1984, No.12, p.5~9.
- [2] R. N. DeMartine, N. W. S. Hollies et. al. "Improved Comfort Polyester" Part II. V. V, «Textile Research Journal», 1984, Vol.54, No.7, p.p.447~458, No.8, p.p.544~548, No. 9, p.p.640~647.
- [3] 《纺织材料学》, p.530, 纺织工业出版社, 1980.