

织物湿传递研究

杨 斌 陈克强

(武汉纺织工学院)

【摘要】 本文分析了织物水蒸汽湿传递及液态水动态湿传递性能,探讨了纤维品种及织物结构对织物湿传递的影响,得出了具有实际意义的结论。

织物湿传递性能是服装舒适性的一个重要方面。人体通过服装的湿传递主要有两种形式,(1)水分蒸发成蒸汽通过服装传递出去,或者这些蒸汽在服装上凝结成水,再散发到空气中,织物的湿阻反映了传湿能力,湿阻通常用相当的静止空气的厚度表示(cm)。(2)液态水由织物的毛细作用而传递,称为芯吸传递,其过程分吸湿、放湿两部分,可分别用吸水率与放湿率反映。

一般而言,织物的湿阻小,吸湿放湿快,服装的湿传递能力强,服装舒适性好。本文分析织物上述两种湿法传递性能,并着重探讨纤维品种、织物结构与织物湿传递之间的关系。

一、织物水蒸汽湿传递

1. 模拟水蒸汽湿传递实验

我们用模拟实验来研究薄板结构与水蒸汽湿传递的关系。在不同厚度 T 的塑料薄板上打有不同孔径 D 和不同孔数 N 的圆孔,用蒸发法来测定其透湿量;即将按要求处理好的塑料薄板盖在容积为200ml,杯口直径 d 为68cm,内装蒸馏水(水面距薄板1cm)的烧杯口并密封,用CS501型超级恒温器加热烧杯,使蒸馏水在70℃恒温下蒸发,蒸发半小时后开始记录。用MP200-1型电子天平(精度为0.01g)称量一小时内烧杯的失水量,即塑料薄板的透湿量 Q ,并根据Fick方程求出相应湿阻 R 。

$$R = D\Delta cAt/Q$$

式中: R 为薄板湿阻(cm); Q 为薄板透湿量

(g); A 为烧杯杯口面积(cm^2); t 为试验时间(3600s); D 为扩散系数(cm^2/s)

$[D = 0.220 + 0.00147m, m$ 为环境空气温度($^{\circ}\text{C}$)]; Δc 为薄板两面水蒸汽浓度差(g/cm^3)。

$\Delta c = 2.89 \times (P_1 \cdot RH_1/T_1) - (P_2 \cdot RH_2/T_2)$
 T_1, T_2 为水面和环境空气绝对温度(K);
 P_1, P_2 为 T_1, T_2 相对应饱和蒸汽压(mmHg);
 RH_1, RH_2 为饱和蒸汽及环境空气相对湿度。

该湿阻包含薄板本身及薄板外表空气层湿阻,杯内水面至薄板内表空气层湿阻。由于实验条件相同,我们可用 R 来反映薄板的相对湿阻。

薄板结构包括薄板厚 T 及孔隙率 $e = ND^2/d^2$,根据湿阻物理意义,我们假设薄板湿阻 R 与 T, e 之间呈线性关系。

$$R = aT + b_0e + c, \quad \text{令 } b = b'/d^2$$

$$\text{则: } R = aT + bND^2 + c \quad (1)$$

参数 a, b, c 可通过实验来确定。

采用一次回归正交法^[1]设计实验方案,选用三因子二水平 $L_6(2^3)$ 正交表。

剔除 T 与 ND^2 相同实验组合 2^* 、 6^* 后,剩下六种组合进行蒸发实验,实验数据见表1,其中: Q 为两次实验均值, R 由Fick方程计算得出。

按(1)式由表1数据求出线性逐次回归方程:

$$R = 1.6717 + 0.3666T - 1.4041 \times 10^{-3}ND^2 \quad (2)$$

$$r = 0.94$$

表 1 $L_8(2^7)$ 正交实验方案及记录

No	1*	2*	3*	4*	5*	6*	7*	8*
T (mm)	1.04	1.04	1.04	1.04	0.52	0.52	0.52	0.52
N (个)	16	16	4	4	16	16	4	4
D (mm)	8	4	8	4	8	4	8	4
ND^2	1024	256	256	64	1024	256	256	64
Q (g)	10.49		4.035	2.8	10.75		5.355	3.06
R (cm)	0.582		1.512	2.17	0.567		1.139	1.99

$$R = 0.6680\tau + 0.0114E - 0.2015$$

$$r = 0.99$$

可见回归方程高度拟合。由此可以说明织物厚度薄、紧度小，则织物湿阻小。这与我们的穿着感觉是一致的。

(2) 纤维品种对湿阻影响

比较代表性纤维品种湿阻如表 3 所示，每栏相比较代表性品种的结构参数 τ 及 E 数值均

大小相反，即一品种的 τ 大，则另一类品种的 E 大，或反之。按(1)所得出的 τ 、 E 对 R 的影响规律，所比较品种的湿阻应接近，而表 3 却显示湿阻对比鲜明，这说明纤维品种起了重要作用。根据表 3 湿传递评价排序可得：麻、丝织物水蒸汽湿传递能力相近，为最佳，棉其次，涤最差。

注：实验条件为水温 70℃，室温 22℃，湿度 60%，无风。

回归方程(2)高度拟合，假设式(1)成立。

由此说明薄板湿阻 R 与 T 、 ND^2 成正线性关系，亦即 R 与板厚 T 及孔隙率 ε 呈线性关系。

2. 织物水蒸汽湿传递

实验方法与模拟实验相同，只是用织物代替薄板盖住杯口，并将蒸馏水温调至 80℃ 以提高蒸发量。共测试十种试样，测一小时内水蒸汽蒸发量(三次平均)，并由 Fick 方程求出湿阻 R ，见表 2。

织物是纤维的集合体，水蒸汽传递现象比打孔的塑料薄板复杂，但就织物结构因素而言，仍可借鉴模拟实验所得规律来认识，即织物湿阻与厚度 τ 及紧度 E ($E = 1 - \varepsilon$) 成线性关系。

下面我们进行分析：

(1) 织物结构对湿阻影响

以原料类似的 1*~5* 麻织物为研究对象，计算湿阻 R 与 τ 、 E 之间的线性逐次回归方程：

表 3 代表性品种湿阻比较

品 种	τ (mm)	E (%)	R (cm)	湿传递
4*、7*	4*大	4*小	4* << 7*	麻 > 棉
4*、5*、9*	9*小	9*大	相近	麻、丝相近
5*、8*	5*大	5*小	8* >> 5*	麻 > 涤
7*、9*	7*大	7*小	7* << 9*	丝 > 棉
7*、8*	7*小	7*大	7 < 8*	棉 > 涤
8*、9*	8*大	8*小	8* >> 9*	丝 > 涤

表 2 试样规格及热阻值

No	大气 环境	品 种	规 格	组织	τ (mm)	E (%)	Q(g)	R (cm)
1*	28℃、RH75%	55R/45C麻布	53×53×198×186	平纹	0.536	79.83	4.72	1.17
2*	28℃、RH75%	55R/45C色布	53×53×222×172	平纹	0.416	81.58	5.105	0.99
3*	23℃、RH85%	粘经麻纬交织布	40×42×201×214	平纹	0.370	77.41	4.635	0.96
4*	23℃、RH85%	纯麻色布	27.8×27.8×234×218	平纹	0.330	72.02	5.36	0.83
5*	23℃、RH85%	纯麻印花布	16.7×16.7×306×254	平纹	0.272	70.13	5.71	0.78
6*	22℃、RH89%	55R/45T色布	18.5×18.5×454×304	平纹	0.235	89.0	4.00	1.14
7*	24℃、RH85%	纯棉印花布	18.5×18.5×224×424	平纹	0.244	82.74	3.93	1.16
8*	24℃、RH85%	涤纶水洗丝	16.7×18.5×266×310	平纹	0.250	73.02	2.645	1.52
9*	22℃、RH89%	真丝软缎	14.0×14.0×115×523	提花	0.225	86.84	5.82	0.81
10*	22℃、RH89%	纯毛花呢	56×56×108×90	平纹	0.674	59.90	4.752	0.96

注：实验条件为水温 80℃，无风。

二、织物液态水湿传递

织物液态水湿传递分吸水与散湿两个环节，织物吸水率大，散湿快，就会使人感到凉爽而舒适。本文采用吸水率法^[2]测试了表2十种试样的吸水率如表4所示。

表4 试样吸水率

t(min)	0	15	35	65	95	125	155
1*	105.4	92.5	90	85.8	79.9	74.6	70.2
2*	82.4	81.8	77.1	71.3	66.8	61.4	56.2
3*	84.5	80.7	75.6	66.6	60.1	54.8	50.3
4*	106.2	79.2	66.6	53.9	34.9	20.2	13.4
5*	99.62	87.1	67.0	56.2	40.3	22.7	12.5
6*	63.2	66.4	61.3	55.2	49.2	43.2	37.1
7*	89.43	84.6	83.8	81.0	78.4	75.5	71.9
8*	77.4	46.3	37.6	24.6	13.7	5.24	0
9*	100.4	89.2	73.5	68.7	58.2	44.6	29.2
10*	98.1	84.3	80.3	76.6	73.1	69.2	67.0

1. 织物吸水性

(1) 织物结构对吸水性影响

织物吸水性乃因芯吸作用所致，受纤维因素影响很大，不能认为1*~5*为同类产品而进行回归。比较同原料的1*与2*及4*与5*吸水性可知，织物紧度大、厚度厚，则织物吸水性好。相对而言，厚度较紧度影响大。

(2) 纤维品种对吸水性影响(见表5)

表5 代表性品种吸水性比较

品 种	τ(mm)	E(%)	吸水率 (t=0)	吸水性能
5*、7*	5*大	5*小	5*>>7*	麻>棉
5*、9*	5*大	5*小	相近	麻、丝相近
5*、8*	5*大	5*小	5*>>8*	麻>涤
7*、9*	7*大	7*小	7*<<9*	棉<丝
7*、8*	7*小	7*大	7*>>8*	棉>涤
8*、9*	8*大	8*小	8*<<9*	丝>涤

按照前述纤维品种对湿阻的影响的分析法同理可得出，麻、丝织物吸水性最佳，棉其次，涤最差。该结论可解释2*、3*试样尽管厚度、紧度较4*、5*大，但因混入吸水性稍差的棉、粘而吸水性下降的现象。

2. 织物散湿性

织物散湿性是一个动态过程，可用织物吸水率的变化速率反映。根据表4数据分布形态，可设吸水率随时间变化规律为：

$$\eta = ae^{-bt} \quad (a > 0, b > 0)$$

利用线性化回归方法可求得表2十种试样回归方程如表6所示。相关系数r均很高，说明回归曲线拟合度很高，可籍此分析问题。

散湿速率 $v = |d\eta/dt| = abe^{-bt}$

$$dv/dt = -ab^2e^{-bt} < 0$$

说明散湿量随时间递增，但散湿速率却随时间减小。现探讨参数a、b对v的影响：

① $a \uparrow \rightarrow v \uparrow$

② $dv/db = e^{-bt} (1 - bt)$

令 $dv/db = 0$ ，则 $t_0 = 1/b$ ，我们称 t_0 为临界时间。

当 $t < t_0$ 时， $dv/db > 0$ ，即 $b \uparrow \rightarrow v \uparrow$

当 $t > t_0$ 时， $dv/db < 0$ ，即 $b \uparrow \rightarrow v \downarrow$

由表6可看出，当 $t \leq 78.17\text{min}$ 时，所有试样的散湿过程都在临界时间内，散湿速率都将随 $b \uparrow$ 而增大。通常穿着湿透服装不会超过该临界时间，下面我们主要讨论这一时间区间内织物的散湿性能。

表6 试样散湿回归方程

No	回 归 方 程	相关系 数 r	临界时间 (min)
1*	$\eta = 99.8170e^{-2.3312 \times 10^{-3}t}$	0.98	428.96
2*	$\eta = 90.3290e^{-2.5152 \times 10^{-3}t}$	0.99	397.58
3*	$\eta = 84.4199e^{-3.4375 \times 10^{-3}t}$	0.99	290.91
4*	$\eta = 107.1534e^{-9.9310 \times 10^{-3}t}$	0.99	100.91
5*	$\eta = 110.1628e^{-1.2792 \times 10^{-2}t}$	0.98	100.69
6*	$\eta = 75.6726e^{-4.6125 \times 10^{-3}t}$	0.98	78.17
7*	$\eta = 87.9142e^{-1.2631 \times 10^{-3}t}$	0.99	216.80
8*	$\eta = 374.2563e^{-6.4075 \times 10^{-2}t}$	0.80	791.70
9*	$\eta = 102.0916e^{-7.1791 \times 10^{-3}t}$	0.98	139.29
10*	$\eta = 90.13734e^{-2.1105 \times 10^{-3}t}$	0.94	473.82

(1) 织物结构对散湿性影响

以原料相近的1*~5*麻类试样为研究对象，用逐次回归法求a、b与τ、E之间的回归方程，当引入一个因子时，得

$$\begin{cases} a = 250.9405 - 2.0191E, & r = 0.81 \\ b = 0.67844 - 9.4808 \times 10^{-4}E, & r = 0.97 \end{cases}$$

当引入两个因子时, 得

$$\begin{cases} a = 344.2977 + 167.2809\tau - 3.7261E, & r = 0.95 \\ b = 7.3290 \times 10^{-2} - 5.9181 \times 10^{-3}\tau - 8.5060 \times 10^{-4}E, & r = 0.97 \end{cases}$$

因子 E 较 τ 先引入, 说明 E 较 τ 重要。 $E \downarrow \rightarrow a \uparrow, b \uparrow$, 说明紧度较小织物散湿性好; τ 的变化将导致 a, b 向相反方向变化, 说明厚度影响较为复杂, 并非厚度越薄织物散湿性越好, 究其原因, 可能是由于本文试样紧度均较大, 其散湿能力主要由织物孔隙率决定, 厚度的变化看其增加或减少织物孔隙率而定。

(2) 纤维品种对散湿性影响

我们已知, a, b 较大, 织物散湿性好, 由此可方便比较出: $8^* > 5^* > 4^*, 9^* > 1^*, 2^* > 7^*$, 现需比较 $4^*, 9^*$ 之间, $1^*, 2^*, 3^*, 10^*, 7^*$ 之间织物散湿性能。

令 $k = (v_1/v_2) = (a_1 b_1 / a_2 b_2) e^{(b_2 - b_1)t}$

$k = 1$, 则 $t'_0 = \ln(a_2 b_2 / a_1 b_1) / (b_2 - b_1)$,

此时 $v_1 = v_2$

若 $b_2 \geq b_1$, 则 $(dk/dt) \geq 0$, 即 $t \uparrow \rightarrow k \uparrow$,

可得:
$$\begin{cases} v_1 < v_2 & (0 < t < t'_0) \\ v_1 = v_2 & (t = t'_0) \\ v_1 > v_2 & (t > t'_0) \end{cases}$$

若 $b_2 < b_1$, 则 $dk/dt < 0$, 即 $t \uparrow \rightarrow k \downarrow$

可得:
$$\begin{cases} v_1 > v_2 & (0 \leq t < t'_0) \\ v_1 = v_2 & (t = t'_0) \\ v_1 < v_2 & (t > t'_0) \end{cases}$$

利用这些规律可比较出织物散湿性如表 7。

由表 7 可得, $v_4 > v_9 > v_3 > v_1 > v_2 > v_{10} > v_7$ ($t \leq 158.09\text{min}$)。综合所得, 织物散湿性 $8^* > 5^* > 4^* > 9^* > 3^* > 1^* > 2^* > 10^* > 7^*$ ($t \leq 158.09\text{min}$)。据此我们可得出: ① 涤纶织物

表 7 织物散湿性比较

比较品种	$0 \leq t < t'_0$	$t'_0(\text{min})$	$t > t'_0$
4*, 9*	$v_4 > v_9$	158.09	
1*, 2*		0	$v_1 > v_2$
1*, 3*	$v_1 < v_3$	199.95	
2*, 3*	$v_2 < v_3$	265.70	
2*, 10*	$v_2 > v_{10}$	437.78	
7*, 10*		0	$v_7 < v_{10}$

散湿性最好, 麻及丝织物其次, 毛织物再次, 棉织物最差。② 麻、丝织物散湿性相当。③ 麻织物混入粘、棉成分后散湿性下降。④ 同原料织物紧度小、厚度薄而散湿快, 这与前面的分析结论一致。

在日常服用中, 织物吸水性较散湿性较为重要, 涤纶织物虽然散湿性最好, 但因吸水性最差, 穿着不吸汗而不透湿, 但当全身大量出汗时, 因其散湿快而使服装快干而有其优势。

三、结束语

综合以上分析, 麻、丝织物湿传递性能最佳, 毛、棉其次, 涤最差, 织物结构疏松、轻薄, 湿传递性能好。在日常穿着中, 水蒸汽湿传递更为常见、重要, 只有在大量出汗情况下, 织物液态湿传递才显得突出。

当水蒸汽在服装上凝结成水再散湿时, 就转变成液态水湿传递现象, 其实, 两种形式的湿传递是交互作用、密不可分的, 其作用原理及规律有待今后进一步研究。

季蕾参与了部分实验工作, 特此致谢。

参 考 资 料

[1] 茆诗松, 《回归分析及其实验设计》, 华东师大出版社, p.141~190。
[2] 《苎麻纺织科技》, No.1, 1992, p. 34。