

蜂窝纸湿帘结构的实验优化

周长吉

(北京农业工程大学)

提 要

本文从分析影响蜂窝纸蒸发降温湿帘蒸发效率的各参数入手,定性分析了空气在湿帘中的流动状态。在此基础上,确定了改进湿帘结构,提高湿帘效率的正交实验。根据该实验结果和部分全面实验,用最小二乘法,归纳出了效率、阻力与湿帘结构和运行参数之间的相互关系式。根据这些关系式,以湿帘静压差为目标函数,在湿帘效率不低于80%的约束条件下,对湿帘结构参数做了优化计算。通过对优化结构的考证实验表明,该优化结构在风速达到1米/秒以上时,能够达到80%以上的效率。

前 言

蒸发降温湿帘是利用水蒸发吸收空气显热来降低空气温度的一种降温装置。它具有能耗低、降温面积大、降温效果显著等优点⁽¹⁾,很适合于我国夏季普遍高温、降温要求量大的国情。这种设备自从五十年代问世以来,经过各国科技工作者的不断改进和完善,现已在欧美、中东等地得到了普遍推广。

一九八二年,我国从美国引进这种设备。通过实际运行表明,该设备在我国气候条件下,可以得到令人满意的降温效果⁽²⁾。近年来,国内许多学者对这种设备在我国的适用范围和推广价值以及材料、试制、安装形式等⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾做了不少工作,但不幸的是至今国内仍无令人满意的产品供工程设计工作者选用。究其原因,主要在于:(1)目前所用湿帘材料耐久性差、使用寿命短;(2)湿帘结构蒸发效率低,不能达到预期的降温效果。

针对目前湿帘存在的问题,本文围绕提高湿帘效率、降低通风阻力这一问题,对湿帘的结构做了深入的实验研究。以正交实验为基础,对影响湿帘效率的主要因素做了定量的分析。在此基础上,以湿帘阻力为目标函数,在效率达到80%以上的约束条件下,对湿帘的结构尺寸进行了实验优化。通过实验证明,该优化结构能够使湿帘工作效率提高到80%以上,可以基本满足农业建筑夏季的降温要求。

一、湿帘效率的影响因素分析

1. 湿帘的结构与空气流动特征

本课题在崔引安教授、黄之栋、周允将老师的指导下进行的。在实验过程中,河南焦作市农业工程设备厂曾给予了大力协助,作者在此谨向他们表示真诚的谢意。

蜂窝纸蒸发湿帘的结构如图1所示。它是由相临两层交错对置的波纹纸片粘结而成的一个空间结构体。每一层波纹纸的波脊都与水平面成一定角度，且相临两层波纹纸的波脊与水平面的夹角互为补角。工作时，循环水沿3的方向喷至湿帘上部，将湿帘全部打湿后沿方向4流出送到循环水池；热空气沿方向1进入湿帘，与循环水发生热湿交换将其显热转化为蒸发潜热，降温后的空气，沿方向2流出，送到降温工作区。

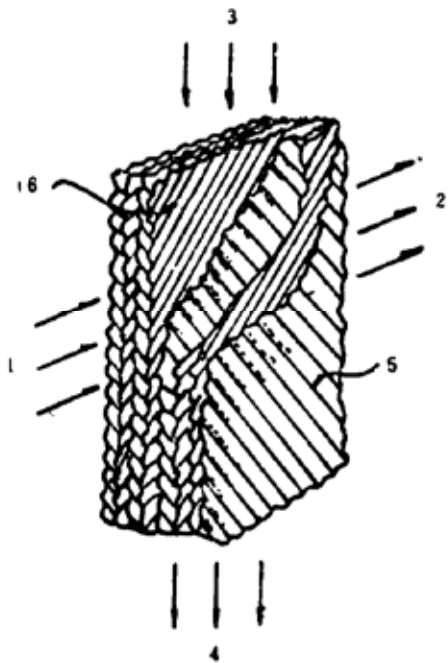


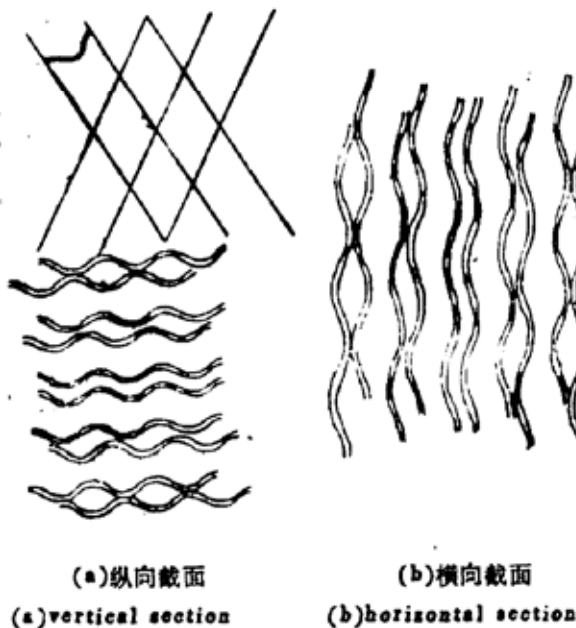
图1 蜂窝纸湿帘结构图
Fig1 Structure of honeycomb paper pad

工作时，循环水沿3的方向喷至湿帘上部，将湿帘全部打湿后沿方向4流出送到循环水池；热空气沿方向1进入湿帘，与循环水发生热湿交换将其显热转化为蒸发潜热，降温后的空气，沿方向2流出，送到降温工作区。

空气在湿帘中的流动比较复杂，其流道是一种三维流道，如图2所示。沿X、Y、Z三个轴线的剖面形状是连续变化的。这种连续变化的流道能使流动空气的流态处于高度紊流状态。空气在流道中既有波动，又有螺旋翻滚运动如图3所示(5)。这种高度的紊流流态，为湿帘内部空气和水的换热提供了良好的换热条件。所以，湿帘的这种结构形式是一种较理想的换热结构。描述这种结构形式的几何参数主要是波纹形状、波高、波长和波纹方向。这些参数和湿帘厚度、空气流速等共同决定了湿帘内部空气的流动状态，同时也形成了湿帘的结构形式和运行工况。

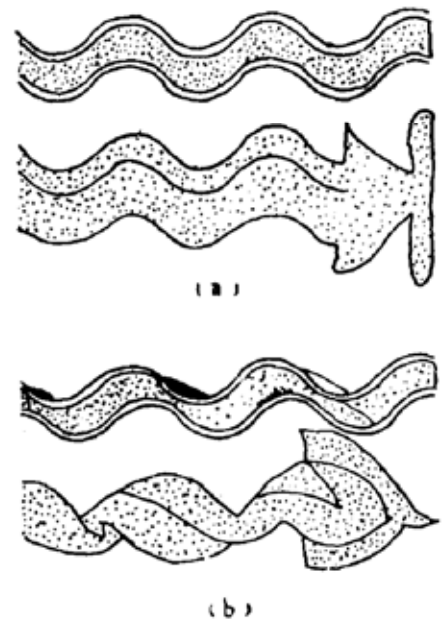
2. 影响湿帘性能的主要因素

描述湿帘性能的指标主要是湿帘的效率和湿帘前后的静压差。这两个指标不仅描述了湿帘的降温性能，而且也刻画了湿帘结构的合理性。



(a)纵向截面 (b)横向截面
(a)vertical section (b)horizontal section

图2 湿帘流道截面图 (波纹角 $\theta = 60^\circ$)
Fig2 Cross section of air path in pad (angle of inclination $\theta = 60^\circ$)



(a)波动运动 (b)螺旋翻滚运动

图3 流体在波纹纸内的流动
Fig3 Air flow in paper pad

湿帘的效率是空气与水热质交换的一个度量。决定空气与水热质交换的因素,主要是空气与水的接触面积和接触时间,以及加强传热的物理和几何因素。包括风速、空气流态、流道形式等。这些因素同时也影响着空气在湿帘中的流动阻力,即湿帘前后的静压差。所以,改善湿帘性能必须从分析这些参数着手。

增加空气与水接触面积的途径主要是增大空气的流道长度、减小波纹纸的波高和波长。空气在湿帘中的流道长度是由湿帘的厚度和波纹纸的倾斜角决定的。厚度和倾角越大,空气流道长度就越长。波纹纸的波高和波长,由于受瓦楞机的齿高和齿厚的约束,并非两个独立参数。在定量分析中,可以舍去波长而只用波高来描述波纹的形状。

在湿帘的厚度、波纹倾角和波高一定后,空气在湿帘中的流道也随之定型,空气流动的边界条件也随之确定。此时,空气在湿帘内部的流态就主要取决于空气流速。空气流速越大,紊流度也就越大,换热强度亦越高;但另一方面,空气流速越大,空气与水的接触时间就越少,这又不利于湿帘效率的提高。所以,空气流速是湿帘效率的一个比较敏感的影响因素。

综上所述,湿帘厚度(D)、波纹纸波高(H)以及波脊与水平面夹角(θ)和空气流速(V)对湿帘的性能指标(效率 η 和阻力 ΔP)都有着直接的影响,并且各参数之间可能是交互作用、彼此影响的。由于湿帘内部空气流动很复杂,各参数之间的作用程度很难判断,用解析分析法不可能得到精确解,这就使实验分析成了确定各参数相互作用的唯一途径。

本文采用“黑箱”原理,将湿帘及其内部流动空气作为一个系统。以湿帘进出口的空气参数作为系统的输入和输出。用正交排列法通过改变湿帘的几何尺寸和运行工况来考察湿帘的输入和输出,从而寻找出合理的湿帘结构和运行参数。

二、实验方法及实验装置

1. 实验方法

由于湿帘的运行参数和几何参数的交互作用,使湿帘性能指标与它们的相互关系变得比较复杂。为了在实验中能够全面地了解各影响因素对性能指标的影响程度,本文采用了多因素多水平有交互作用的正交实验法。将V、D、H、 θ 作为四个考察因素,根据有关文献的报道(8)、(10)~(16),选定各因素的实验范围如表1。在此基础上,每个因素取三个水平来考察各因素的作用程度。

按正交表的要求(6),如用四因素三水平,必须选用 $L_{81}(3^4)$ 正交表。用此表需81个实验,工作量是相当可观的。即使不考虑风速V,选用 $L_{27}(3^3)$ 也要做出27种结构形式。为了减少实验工作量而又不影响实验分析,现对四个基本参数作一调整合并。由于倾角 θ 和厚度D可以合并为“名义流道长度l”(l = D/cos θ),所以用l代替D和 θ 就可以将四因素压缩为三因素。此时选用 $L_{27}(3^3)$ 正交表就只需要9种结构形式了。合并后的三因素三水平排列顺序如表2。据此选用 $L_{27}(3^3)$ 正交表排出三因素三水平有交互作用的正交实验表头如表3。为了能对D和 θ 以及它们之间的交互作用有所了解,配合 $L_{27}(3^3)$ 正交表采用等波高全面实验来进一步分析D和 θ 对湿帘性能指标的影响。

2. 实验装置

实验装置主要由风机、湿帘和连接风筒组成,其结构如图4所示。风机采用FTA-60型

表 1

各参数水平选定表

Table Selection level of parameters

选 择 参 数	资 料 来 源	资料选用范围	选定范围	选 定 水 平		
				1	2	3
V (m/s)	金羽周 Short Welchert Wiersma	0.9—1.3 0.8—1.8 1±0.25 1.0—1.27	0.7—2.0	0.6	0.9	1.2
D (cm)	金羽周 Hein ASAE 标准	4—10 10 10, 15	8—16	8	12	16
θ (度)	Meek Norback Harry sharp co.	20—50 35—70 53	20—75	20	45	60
H (mm)	Bredberg Meek Norback 美国产品	1—7 5—20 0.5—1 —6	0.5—20	3	6	12

表 2

三因素三水平排列顺序表

Table 2 Range order of three factors and three levels

水 平	因 素	A*(流道长度l)	B(波高H)	C(风速v)
1		11.3	6	0.9
2		24	3	0.6
3		17	9	1.2

* $l_1 = D_1 / \cos\theta_1$; $l_2 = D_2 / \cos\theta_2$; $l_3 = D_3 / \cos\theta_3$.

表 3

三因素三水平有交互作用的正交实验设计表头

Table 3 Table head of interactions of three factors and three level in orthogonal experiment

因 素 排 列	A	A×B	B	A×B	A×C	A×C	C	B×C				B×C	
列 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

轴流式排风机。湿帘面积为 $60 \times 100 \text{cm}$ 。风筒系按《通风机性能实验方法》(GB1236-76)⁽⁹⁾设计的, 截面为 $60 \times 60 \text{cm}$ 的正方形。风筒与湿帘的连接采用 30° 渐扩筒, 与风机的连结采用白帆布将方截面转换成圆截面, 并切断风机振动的传递。在帆布过渡段之前的风筒上设有调节风量的风闸。为了防止外界太阳辐射和对流传热影响风筒内部流体的流动工况, 在风筒外包了一层厚约 3cm 的棉絮, 在实验台上方用石棉瓦搭有实验棚。湿帘用循环水由 1 吋水泵供给。

用两台通风干湿球温度计分置湿帘前方两侧, 测定进入湿帘前的空气干球温度。将直径为 0.2mm 的 9 组铜-康铜热电偶按要求⁽⁷⁾⁽⁹⁾布置于风筒内距湿帘 25cm 处的截面上, 测定经

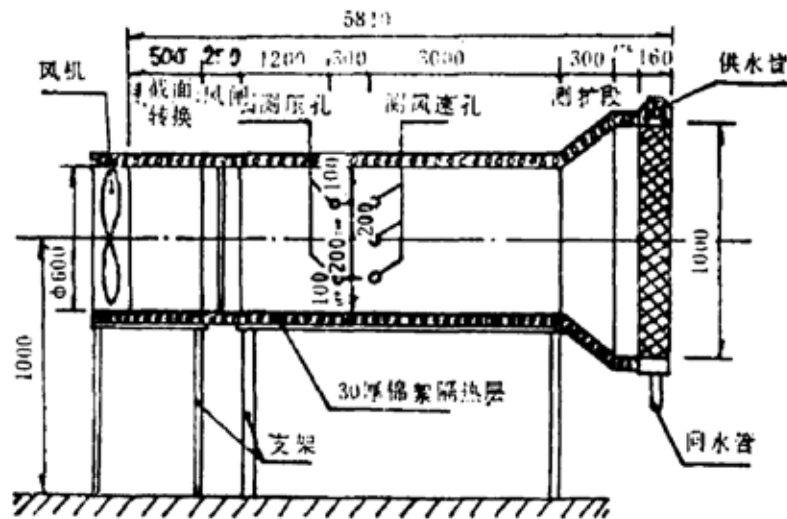


图 4 湿帘性能实验装置

Fig 4 Testing equipments for pad performance

过湿帘后空气的干球温度。用量程为0—5m/s的热球式电风速计测定距湿帘3.4m风筒内截面上的平均风速（九个测点的平均值），将这个平均值按流体连续性方程换算成湿帘安装截面的风速即为空气通过湿帘的垫面风速。

为了测得湿帘前后的静压差，在距离湿帘3.7米的风筒四壁上均匀布置八个测孔。将 $\varnothing 2 \times 3$ 的紫铜管用锡焊焊于其上，并磨平内壁测管伸出的管头。八个测点的压力全部引入 $\varnothing 50 \times 40$ 的圆柱形混合器，混合均匀后用补偿式微压计测定其相对于大气压的压力。用该测定值减去风筒相同风速下的阻力，即为该风速下湿帘前后的静压损失。

测定时，先打开水泵打湿湿帘，然后调节风闸控制风量使湿帘的运行工况达到实验设计的要求。每测定一个工况用半小时的稳定期。

三、实验结果及其分析

从实验结果看，波高 H 、倾角 θ 、厚度 D 和风速 V 对湿帘的性能指标都有影响，其基本规律是：

1. 波高 H 减小，温度效率提高，静压损失增大，如图5、图6。在波高很小时，阻力呈直线变化。从图可见，波高从10mm降到6mm，效率提高较多而阻力增加较少；波高从6mm降到3mm，阻力增加了很多，而效率则基本上达到了极限。可见，波高在6mm左右时两个指标较好。

2. 增加流道长度能够提高湿帘效率。组成流道长度的两个参数 θ 和 D 对湿帘的性能指标不仅有单独作用而且还有交互作用。一般随角度的增加，效率和阻力都有显著增加（如图7、图8），而增加厚度效率增加较多，阻力增加却较小（如图9、图10）。

从波高为6mm湿帘结构形式的全面实验（表4）可以看出：角度从 45° 增加到 60° ，效率提高约8%，阻力增加 $1\text{mmH}_2\text{O}$ ；厚度从8cm增加到12cm，效率提高约4—5%，阻力增加仅 $0.1—0.3\text{mmH}_2\text{O}$ 。这就是说，在同样流道长度的条件下，增加厚度比增加倾角对湿帘性能指标提高更有利，但增加厚度比增加角度所用的材料用量（如表5）也大。因此，从系统

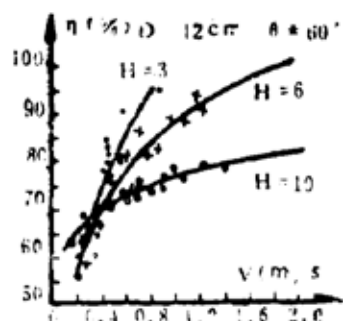


图5 不同波高下的效率
Fig 5 Efficiencies under different wave height

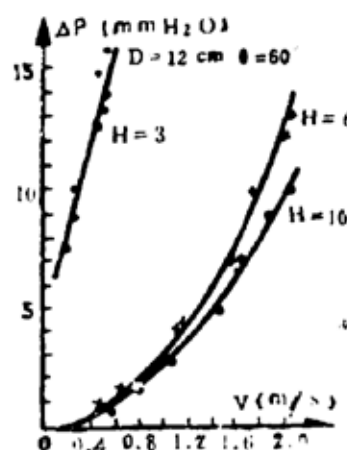


图6 不同波高下的静压差
Fig 6 State pressure differences under different wave height

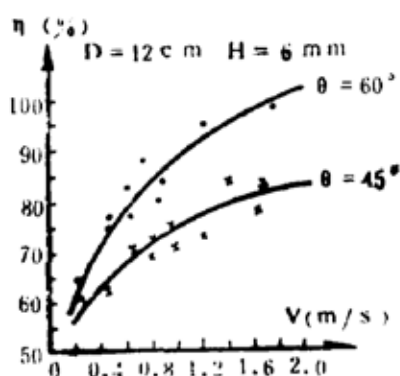


图7 倾角对效率的影响
Fig 7 Impact of angle of inclination on efficiency

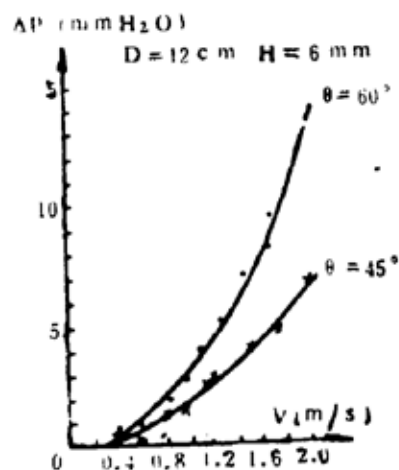


图8 倾角对阻力的影响
Fig 8 Impact of angle of inclination on state pressure difference

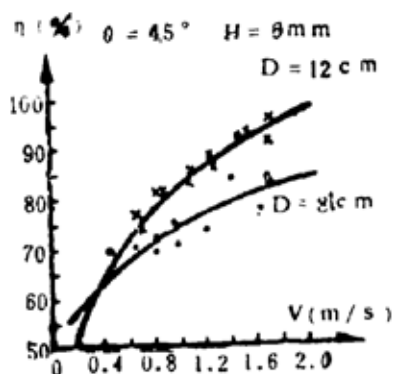


图9 厚度对效率的影响
Fig 9 Impact of thickness of on efficiency

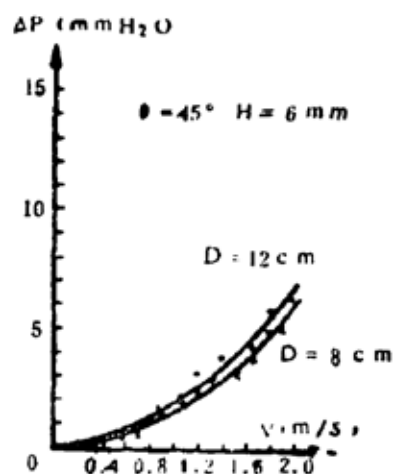


图10 厚度对阻力的影响
Fig 10 Impact of thickness of pad on resistanc

表 4 波高6mm湿帘的效率(%) / 阻力(mmH₂O) 实验结果

Table 4 Experimental results of efficiency (%) / resistance (mmH₂O) of pad with 6mm wave height

规格	风速(m/s)				平均
	0.6	0.8	1.0	1.2	
D=12cm, θ=60°	77.74/0.994	83.01/1.839	87.10/2.95	90.44/4.379	84.57/2.544
D=12cm, θ=45°	75.77/0.68	79.77/1.138	82.88/1.737	85.42/2.453	80.96/1.497
D=8cm, θ=60°	72.15/0.982	77.90/1.716	82.36/2.644	86.00/3.766	79.80/2.277
D=8cm, θ=45°	73.02/0.596	76.01/1.030	78.33/1.576	80.23/2.230	76.90/1.358

表 5 6mm波高湿帘用纸量 *

Table 5 Amount of paper used for 6mm wave height pads

湿帘规格	D=12cm, θ=60°	D=12cm, θ=45°	D=8cm, θ=60°	D=8cm, θ=45°
用纸量(kg/m ²)	4.4105	4.9612	3.5423	3.9845

* 纸的定量为 180 g/m².

经济的观点出发,应该是在保证一定性能指标的条件下兼顾制造成本和运行费用,使总体系统达到最优组合。

3. 风速与效率的关系基本上呈对数关系,与阻力的关系呈指数关系。在小风速低波高条件下,风速与阻力基本上呈直线关系(如图11、图12)。在小风速下,增加风速可以显著地提高效率;在大风速下,增加风速效率提高很少而阻力增加却较多。所以湿帘工作时不宜采用高风速。一般在风速为1—1.5m/s时效率基本上可以满足要求,而此时阻力上升还较缓慢。

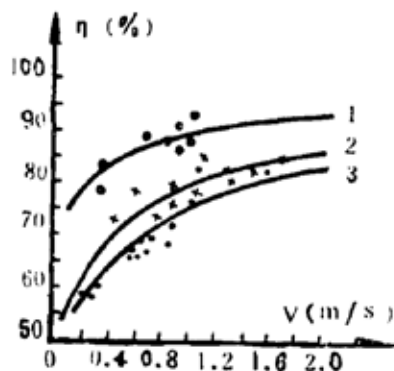


图11 风速对效率的影响

Fig11 Impact of air velocity on efficiency

- 1—D=12cm, θ=45°, H=3mm
- 2—D=8cm, θ=60°, H=6mm
- 3—D=16cm, θ=20°, H=10mm

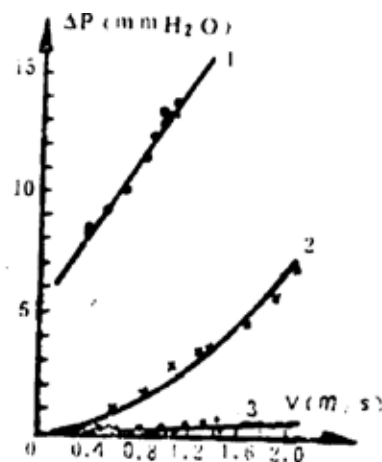


图12 风速对阻力的影响

Fig12 Impact of air velocity on resistance

- 1—D=12cm, θ=45°, H=3mm
- 2—D=8cm, θ=60°, H=6mm
- 3—D=16cm, θ=20°, H=10mm

4. D 、 H 、 θ 、 V 除了单独对湿帘性能指标起作用外,它们彼此还有交互作用。表6和表7是三因素三水平有交互作用的正交实验结果及其相关性分析。从分析结果看, A 、 B 、 $A \times B$ 和 C 对 η 和 ΔP 的影响都是非常显著的,亦即湿帘的结构尺寸 D 、 θ 、 H 对湿帘的性能指标有决定性作用,并且它们之间还有交互作用。

表6 各因素方差分析表

Table 6 Differentia analysis on factors

指标	方差名称	A	A×B	B	A×C	B×C	C	E	E Δ
η	S	672.94	139.96	1414.20	4.83	48.95	533.93	34.04	38.85
	f	2	4	2	4	4	2	8	12
	V	336.47	34.99	707.10	1.21	12.24	266.97	4.25	3.24
	F	103.94	10.81	218.43		3.78	82.47		
	显著性水平 ^[1] %	0.1	1	0.1		5	0.1		
ΔP	S	154.78	141.07	908.24	19.97	15.58	39.16	10.38	45.93
	f	2	4	2	4	4	2	8	16
	V	77.39	35.27	454.12	4.99	3.89	19.58	1.30	2.87
	F	26.96	12.29	158.20			6.82		
	显著性水平 ^[2] %	0.1	0.1	0.1			1		

注: [1] $F_{0.001}(2, 12)=12.97$; $F_{0.01}(4, 12)=5.41$; $F_{0.5}(4, 12)=3.26$.

[2] $F_{0.001}(2, 16)=10.97$; $F_{0.001}(4, 16)=7.94$; $F_{0.01}(2, 16)=6.23$.

合理地利用这种交互作用可以使湿帘性能指标超过单因素改变引起性能指标的增(减)值。如图13、图14,在流道长度基本相等的条件下,结构几何尺寸的不同组合可以引起湿帘性能指标的较大变化。所以,合理选择结构几何尺寸及其组合,对于提高湿帘的性能指标具有重大的实用价值。为了找出合理的几何尺寸组合,必须对它们进行优化分析。

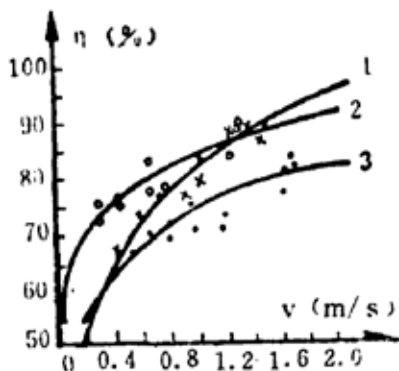


图13 交互作用对效率的影响

Fig13 Impact of interaction on efficiency
1— $D=8$ cm, $\theta=45^\circ$, $H=5.36$ mm; 2— $D=16$ cm, $\theta=20^\circ$, $H=5.36$ mm; 3— $D=12$ cm, $\theta=45^\circ$, $H=5.73$ mm

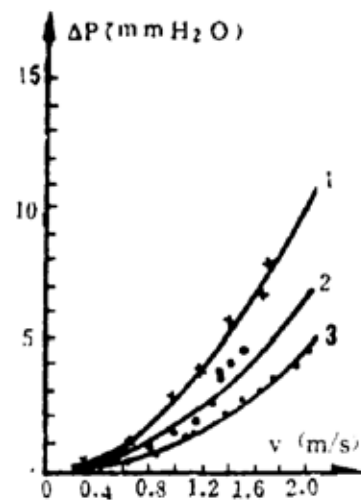


图14 交互作用对阻力的影响

Fig14 Impact of interaction on resistance
1— $D=12$ cm, $\theta=45^\circ$, $H=5.73$ mm; 2— $D=8$ cm, $\theta=60^\circ$, $H=5.36$ mm; 3— $D=16$ cm, $\theta=20^\circ$, $H=6.17$ mm

表 7

三因素三水平交互作用正交实验结果

Table 7 Orthogonal experimental results of interactions of three factors and three levels

	A	A×B	B	A×B	A×C	A×C	C	B×C			B×C			η(%)	ΔP (mmH ₂ O)
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	80.25	1.289
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	72.15	0.596
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	86.00	2.230
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3	81.32	10.020
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1	73.30	8.397
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	86.72	11.643
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2	59.76	0.588
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3	52.77	0.303
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	64.73	0.942
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	100.0	27.33
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1	97.72	21.59
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	83.11	15.85
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2	76.92	3.803
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3	74.99	2.168
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1	72.28	0.982
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1	90.44	4.379
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2	85.17	2.366
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	77.74	0.994
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	68.41	0.153
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3	76.46	0.349
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1	73.12	0.248
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1	79.46	0.407
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	86.45	1.684
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3	83.55	0.934
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3	75.38	8.410
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1	90.80	10.264
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2	86.65	9.337

四、湿帘结构参数的优化

根据以上实验结果,用最小二乘法将所有数据整理成效率和阻力综合曲线,结合湿帘材料用量组成如下的优化模型:

(1) 阻力最小:

$$\min \Delta P = \frac{1}{21.1} \times (5.49V)^{D^{-0.002875} \cdot \theta^{0.304888} \cdot H^{-0.088902}} \times 7.9965 \quad (1)$$

(2) 用纸量最小:

$$\min W = 37.2894 \times D^{0.54067} \cdot \theta^{-0.40896} \cdot H^{-1.00672} \quad (2)$$

约束条件:

(1) 效率约束:

$$\eta = -1604.17 + 1666.87 \times (D/H \cos \theta)^{0.01} + 12.04 \times (D/H \cos \theta)^{0.11} \ln V \geq 80\% \quad (3)$$

(2) 厚度约束: $8 \leq D \leq 16$ (4)

(3) 倾角约束: $15 \leq \theta \leq 75$ (5)

(4) 波高约束: $4 \leq H \leq 11$ (6)

(5) 风速约束: $V \leq 1$ (7)

对于以上模型用SCDD法进行优化, 其结果为:

在 $D = 11.126\text{cm}$, $\theta = 55.01^\circ$, $H = 6.2\text{mm}$, $V = 1\text{m/s}$ 时达到最优值, 此时, $\Delta P = 1.77\text{mmH}_2\text{O}$, $\eta = 81.66\%$ 。

为了验证优化结果的可靠性, 对 $D = 11\text{cm}$, $\theta = 55^\circ$, $H = 6.2\text{mm}$ 的湿帘优化结构作了进一步的性能实验, 如图15、图16。从图可见, 优化值与实验值吻合得较好。在所实验的参数范围内, 整理出的优化模型是可靠的, 可以用它来进行产品的系列生产。

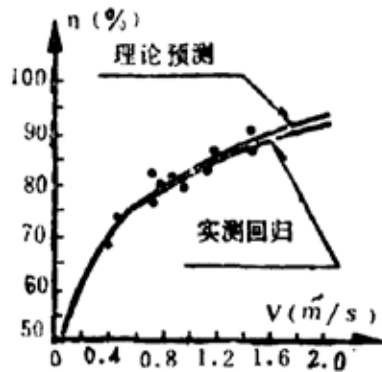


图15 效率优化验证曲线

Fig 15 Efficiency verification of optimal structure

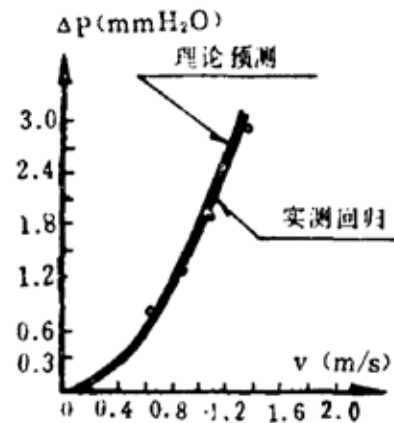


图16 阻力优化验证曲线

Fig16 Resistance verification of optimal structure

五、结 语

1. 本文在分析影响湿帘性能指标因素的基础上, 采用正交试验与部分全面实验相结合的方法对各因素进行了实验分析。通过实验发现, 湿帘的结构几何参数和运行参数共同决定着湿帘的性能, 并且结构几何参数对湿帘的性能指标具有强烈的交互作用。

2. 以实验为基础, 在温度为 $30-35^\circ\text{C}$, 湿度为 $30-60\%$, 循环水量为 $0.8\text{l/m}\cdot\text{s}$, 风速为 1m/s 的运行工况下, 对结构几何尺寸进行了优化分析, 并通过实验证明了优化模型的可靠性。通过分析计算, 提出了 $D = 11\text{cm}$, $\theta = 55^\circ$, $H = 6.2\text{mm}$ 的优化结构形式。该结构湿帘, 在实际运行时, 风速可在 $1.0-1.5\text{m/s}$, 此时, 效率可达到 $81-87\%$, 阻力为 $1.77-4.34\text{mmH}_2\text{O}$ 。风速再提高, 效率增加很少, 而阻力增加却很多; 另一方面, 在高风速下, 增加风速将使大量未完全蒸发的水滴随流动空气一起流出湿帘, 致使大量自由水滴带入室内, 影响室内工作环境。

3. 本实验采用“黑箱”方法进行研究, 没有对湿帘内部流动空气的流态及其传热、传

质过程作详细的分析和计算。因此，所有计算都依据于实验数据。如能在此基础上，推出更合理的解析分析方法更好。

参 考 资 料

- [1] 宋光华：“工厂化农业降温技术可行性研究报告”中国农机院北京农机化所 1985.1.
- [2] 马兴仁：“利用刨花箱蒸发冷却降低畜禽舍气温的初步研究”东北农学院学报 3 1982.
- [3] 陈树林：“奶牛舍机械通风的模型实验与研究”北京农业机械化学院学报 1 1984.
- [4] 金羽周：“机械通风、湿帘蒸发降温、温室热环境的研究”北京农业工程大学硕士学位论文 1985.
- [5] 罗棣庵等：“板式换热器内流动不均匀性的分析”《传热传质学文集》科学出版社，1986.4.
- [6] 北京大学数学力学系概率统计组编：《正交设计法》石油化学工业出版社 1979.
- [7] 陕西省第一设备安装公司编：《空调试调》，中国建筑工业出版社 1977 P204~207
- [8] J.J.哈南等著、郑光华等译：《温室管理》科学出版社 1984.
- [9] GB1236—76，“通风机性能实验方法”。
- [10] Midwest Plan Service, Structural and environmental handbook, 11th, 1983, Iowa State University.
- [11] Welchert, W.T., et al, Evaporative cooling pad cabinet design, progressive agri. in Arizona, 1—2, 1975.
- [12] Wiersma, F., Evaporative cooling fundamentals in agricultural applications, ASAE technical paper preprint, for presentation at the 1969 annual conention—Pacific coast region, American Society of agri.eng..
- [13] ASAE Standard Heating Ventilation and Cooling Greenhouse, ASAE EP406, 1984.
- [14] Meek, G.W., et al, Gas and liquid contact apparatus, U.S.P. 8, 500, 615
- [15] Norback, P.G., et al, Air and water contact body as employed in cooling towers, U.S.P. 8, 395, 903.
- [16] Breberg, J.H., et al, Contact bodies for liquid and gas, U.S.P. 8, 262, 682.

EXPERIMENTAL STUDY FOR OPTIMAL CONSTRUCTION OF HONEYCOMB PAPER PAD

Zhou Changji

(Beijing Agricultural Engineering University)

ABSTRACT

Based on the principle of "Black—box", this paper analysed the input and output parameters of honeycomb paper pad system used for lowering the temperature in greenhouses. The relationships between these input and output parameters are complex because they are mainly affected by both the structural geometric sizes of the pad and the air flow velocity passing through the pad. The orthogonal experimental method is used to analyse the pad system. According to the orthogonal experiments and some other supplementary experiments, a set of empirical formulae for evaporative efficiency and state pressure difference were derived with the least square method. By these formulae, an optimal set of the structural geometric sizes is calculated. The calculated result shows that the evaporative efficiency is higher than 80%. As the author of this paper made several performance tests of the pad with the calculated structural geometric sizes the results were satisfied.