

# 内循环式封闭空间膨胀珍珠岩除湿试验研究

陈小兰<sup>1</sup>, 赵映<sup>2</sup>, 朱和霖<sup>2</sup>, 孙敢<sup>2</sup>, 王洪亮<sup>2</sup>, 张瑞宏<sup>2</sup>

(1. 扬州技术师范学院, 江苏扬州 225009; 2. 扬州大学机械工程学院, 江苏扬州 225009)

[摘要] 设计了一种封闭空间膨胀珍珠岩除湿的吸附系统, 进行了湿空气流速、吸附剂层数和吸附剂铺放密度的单因素试验和三因素三水平正交试验, 分析了各因素对除湿系统除湿性能的影响关系。试验结果表明, 随着气流速度的增加, 除湿速度随之增大, 单位能耗也相应地减少, 在一定范围内可采用相对较高湿空气流速, 提高除湿效率; 随着吸附剂层数的增多, 除湿能力提高; 随着吸附剂铺放密度的增加, 湿空气与吸附剂颗粒之间的传热传质能力得到提高, 除湿速率增大, 单位能耗相对减少。

[关键词] 内循环式; 封闭空间; 膨胀珍珠岩; 除湿; 温室

[中图分类号] TQ424.26; TQ028.15 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)09-0101-04

## 1 前言

吸附除湿法是采用吸附材料吸附空气中的水蒸气, 这种除湿法分静态和动态两种<sup>[1,2]</sup>。对于静态吸附方法, 当室内的容积增大时, 就要增多吸附剂量, 并且需要经常更换吸附剂, 很不经济, 显然动态吸附比静态吸附效果更好<sup>[3~5]</sup>。而动态吸附处理空气量大, 可在低温、低湿状态获得低露点的空气, 再生热源除使用电能外, 还可利用蒸气、煤气、太阳能、工业废热等低品位的热源, 节约大量的能源, 不用压缩机, 没有氟氯烃对大气臭氧层的污染问题<sup>[6~9]</sup>。设备在接近大气的条件下运行, 旋转部件少, 结构和维护简单, 噪声低, 运行可靠, 因而这种除湿法受到广泛重视<sup>[10]</sup>。文章设计了一种适合封闭空间除湿的吸附除湿系统, 对于除湿的吸附剂层数、分布密度以及通过吸附剂层的空气流速等因素与除湿效果、能耗的关系进行了研究。

## 2 试验设计

吸附除湿系统原理如图 1 所示, 由加湿系统、除湿系统、测试系统等组成。a. 加湿系统采用超声波

高频振荡, 将水雾化为  $1 \sim 5 \mu\text{m}$  的超微粒子, 通过风动装置将水雾扩散到空气中, 从而达到均匀加湿空气的目的。标准加湿量为大于或等于  $250 \text{ mL/h}$ , 水箱容积为  $5 \text{ L}$ 。b. 除湿系统包括离心风机、电动机、调速器、吸附剂层等。c. 测试系统测量的值为电动机能耗、时间及湿空气的流速, 其中电动机能耗由电表直接读数, 除湿用时由人工气候室的控制面板上的时控器记取, 湿空气的流速由 86 型多功能测试仪测量。

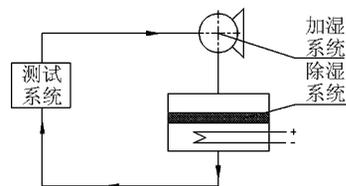


图 1 吸附除湿系统原理

Fig. 1 Principle of adsorption dehumidification system

试验过程中吸附剂初始层数为两层, 吸附剂铺放密度为  $2\ 505.7 \text{ g/m}^2$ 。湿空气气流速度为  $0.2$ 、 $0.5$ 、 $0.7$ 、 $0.9 \text{ m/s}$ 。试验所用的仪器及工具是感量

[收稿日期] 2008-09-04; 修回日期 2011-05-09

[基金项目] “十一五”江苏省科技支撑计划资助项目(BE2008365); 江苏省农机三项工程资助项目(NJ2008-35)

[作者简介] 陈小兰(1974—), 女, 江苏扬州市人, 扬州技术师范学院讲师, 主要研究方向为农业机械与农业生物质燃料;

E-mail: zhaoying274211078@163.com

为 1 g 的架盘天平、YC - D205 型亚都超声波加湿器、86 型直读式多功能测速仪、电表。供气系统为人工气候室：容积为 3 350 mm × 1 850 mm × 2 450 mm，工作环境温度为 20 ℃，相对湿度 80%，通过除湿过程要求将相对湿度降至 60%，人工控温精度为 ±1 ℃，控湿精度为 ±10%。试验中选用膨胀珍珠岩作为吸附剂。其颗粒内部是蜂窝状结构、无毒、无味、不腐、不燃、耐酸、耐碱。特点是容积密度轻、绝热及吸音性能好，具有吸附能力。此种吸附剂中含质量分数为 69% ~ 72% 的 SiO<sub>2</sub>，12% ~ 18% 的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，还有少量的 K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgO 等。一般吸附剂层数越多越有利于除湿，试验选定 3 层吸附剂层，并将放置吸附剂层的支承板设计为钢丝网状的板。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 试验结果

湿空气流速、吸附剂层数、吸附剂铺放密度等参数对除湿系统的除湿性能有直接关系。在除湿过程中，进行了湿空气流速、吸附剂层数和吸附剂铺放密度的单因素试验和三因素三水平正交试验，初始状态的湿度为 80%，试验指标为除湿量的单位能耗和除湿耗时。测量结果见表 1。

表 1 除湿性能试验测量结果

Table 1 Results of dehumidification performance tests

湿空气流速 $u/(m \cdot s^{-1})$	吸附剂 层数 $n$	吸附剂铺放 密度 $X/$ ( $g \cdot m^{-2}$ )	除湿量的 单位能耗 $SPC/(kW \cdot h \cdot g^{-1})$	除湿耗时 $T/min$
0.2	1	2 505.7	0.003 2	101
0.5	2	2 505.7	0.003 1	94
0.5	1	2 871.4	0.003 3	103
0.5	2	2 871.4	0.003 2	87
0.7	1	2 150.0	0.003 2	92
0.7	2	2 505.7	0.003 0	78
0.7	3	2 871.4	0.002 9	54

#### 3.2 分析与讨论

##### 3.2.1 湿空气流速对除湿性能的影响

图 2 为湿空气流速与单位能耗和除湿消耗时间的关系。从图 2 中可以看出，增大流速对除湿过程是有利的，这与普通干燥机相反。对于普通干燥机而言，增大大气流速，会使排出干燥器的废气带走的

热量增加，致使热损失提高，单位热耗增加，从而干燥机的热效率降低。但随着气流速度增大至一定程度，由于空气流量急剧增大，能量消耗也增大，单位能耗便不再降低，甚至可能增大。因此，这种吸附除湿法在一定范围内可采用相对较高的湿空气流速，提高除湿效率。

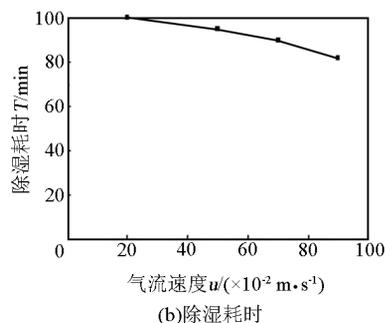
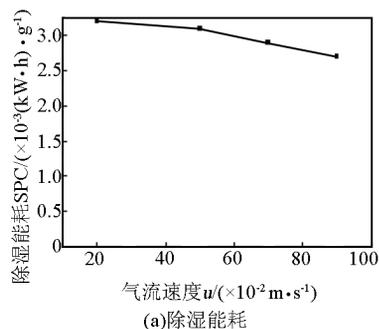


图 2 气流速度对除湿性能的影响  
Fig. 2 Influence of air velocity on dehumidification performance

##### 3.2.2 吸附剂层数对除湿性能的影响

试验时湿空气流速为 0.5 m/s，吸附剂铺放密度为 2 871.4 g/m<sup>2</sup>，吸附剂层数的为 1, 2, 3 层。结果如图 3 所示。由图 3 可见，随着吸附剂层数的增加，除湿能耗和除湿耗时都逐渐减少。其原因是随着吸附剂层数的增加，湿空气与吸附剂球之间传质较充分，除湿能力提高，去水量增大，所用的时间就相对减少，单位耗能就下降了。

##### 3.2.3 吸附剂铺放密度对除湿性能的影响

试验时湿空气初始流速为 0.7 m/s，吸附剂层数为 3 层，吸附剂铺放密度为：2 150.0、2 505.7、2 871.4 g/m<sup>2</sup>。试验结果如图 4 所示。由图 4 可知，随着吸附剂铺放密度的增加，除湿能耗和除湿用时都降低，除湿效果有利。其原因是随着吸附剂铺放密度的增加，湿空气流与吸附剂颗粒之间的总传热传质面积增大，从而提高了湿空气与吸附剂颗粒之

间的传热传质能力。由此导致单位时间内去水量增大,即除湿速率增大,所以单位能耗下降,除湿耗时相对减少。

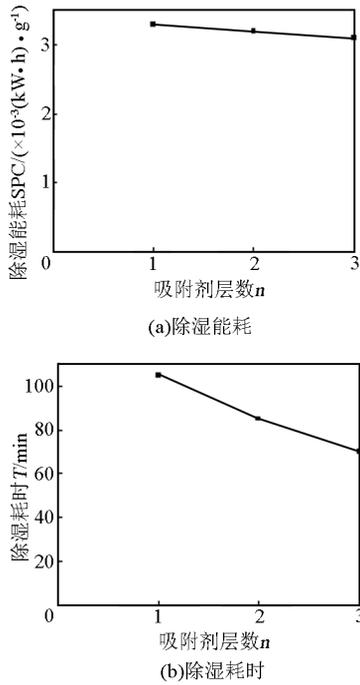


图3 吸附剂层数对除湿性能的影响

Fig.3 Influence of number of adsorbent piles on dehumidification performance

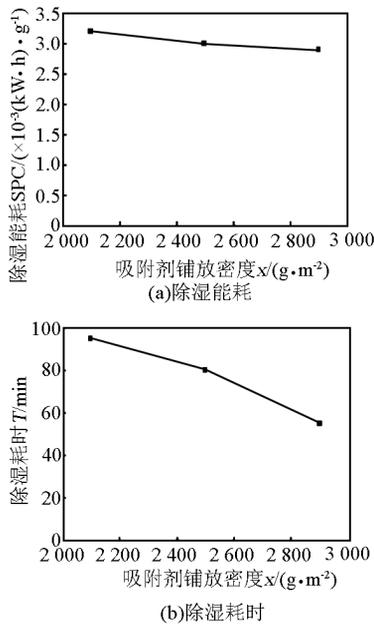


图4 吸附剂铺放密度对除湿性能的影响

Fig.4 Influence of adsorbent laying density on dehumidification performance

### 3.2.4 除湿影响因素分析

各参数的影响见图5所示。由图5可以看出,对于SPC来说,参数的最佳组合为  $u_3, n_3, X_3$ ; 对于T来说,参数的最佳组合为  $u_3, n_3, X_2$ 。

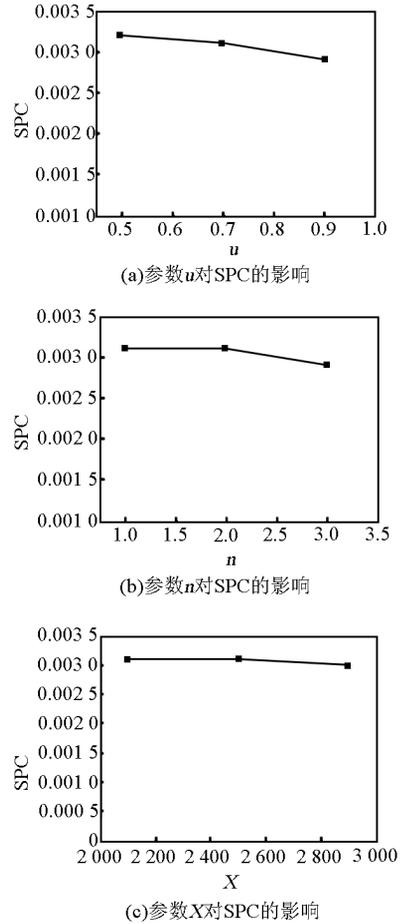


图5 各因素对SPC指标的影响

Fig.5 Influence of each factor on SPC

用综合加权评分法来分析可以确定最佳组合。

1) 本试验的各项试验指标的权W: 总权为1, 即

$$\sum_{j=1}^2 W_j = 1$$
。除湿能耗SPC是评价除湿系统的最重要的指标,它关系到本系统的节能问题。故确定SPC指标的权数  $W_1 = 0.8$ 。故另一指标除湿耗时的权数  $W_2 = 0.2$ 。

2) 计算各项指标的极差,在表1中,各试验指标的极差为:

$$R_j = |Y_{\max j} - Y_{\min j}| \quad (1)$$

式(1)中,  $Y_{\max j}$  为该指标试验结果中的最大数;  $Y_{\min j}$  为该指标试验结果中的最小数。

由此,SPC极差  $R_1 = 0.0005$ , T极差  $R_2 = 56$ 。

3) 计算各项试验指标观察值的评分值,将观察

值的极差  $R_j$  分为 100 分, 中间的值  $Y_M$  与最差值  $Y_{\min}$  (或  $Y_{\max}$ ) 的差越大, 得分越高, 其计算式为:

$$Y_j = \frac{|Y_M - Y_{\max}|}{R} \times 100 \quad (2)$$

式(2)中,  $Y_j$  为各项试验指标观察值的评分值。

对于除湿能耗:

$$Y_1 = \frac{|Y_{M1} - 0.0033|}{0.0005} \times 100 \quad (3)$$

对于除湿耗时:

$$Y_2 = \frac{|Y_{M2} - 112|}{56} \times 100 \quad (4)$$

4) 因素、水平的权数如表 2 所示。

表 2 各因素、水平的权数

Table 2 Weight of each factor and level

因素	水平	权数
湿空气流速 $u$	0.5	19.096
	0.7	39.618
	0.9	78.524
吸附剂层数 $n$	1	36.882
	2	40.690
	3	75.666
吸附剂铺放密度 $X$	2 150.0	39.500
	2 505.7	41.286
	2 871.4	56.452

由表 2 可以看出,  $Wu_3 > Wu_2 > Wu_1$ ,  $Wn_3 > Wn_2 > Wn_1$ ,  $WX_3 > WX_2 > WX_1$ 。所以其最佳组合应为  $u_3, n_3, X_3$ ; 其次是  $u_2, n_2, X_2$ 。

## 4 结语

1) 随着气流速度的增加, 除湿速度也就随之增大, 除湿耗时也相应地减少, 在一定范围内可采用相对较高湿空气流速, 提高除湿效率。

2) 随着吸附剂层数的增加, 除湿能耗和除湿耗时都逐渐减小, 除湿能力提高, 去水量增大, 单位耗能下降。

3) 随着吸附剂铺放密度的增加。除湿能耗和除湿耗时都降低, 对除湿效果有利。

4) 对于除湿能耗  $S$ , 除湿耗时  $T$  的影响, 参数  $u$  为最大, 其次是  $n$ , 再次是  $X$ 。除湿影响因素正交试验的最佳组合应为: 湿空气流速  $u$  为 0.9 m/s, 吸附剂层数  $n$  为 3 层, 吸附剂铺放密度  $X$  为 2 871.4 g/m<sup>2</sup>。

## 参考文献

- [1] Trigui M, Barrington S F, Gauthier L. Effects of humidity on tomato water uptake, yield, and dehumidification cost [J]. Canadian Agricultural Engineering, 1999, 41(3): 135-140.
- [2] Araki V. Effects of environmental conditions on plant water status in tomato [J]. Journal of the Japanese Society for Horticultural Science, 1993, 61(4): 827-837.
- [3] Xu H L, Wang R, Gauthier L, et al. Tomato leaf photosynthetic responses to humidity and temperature under salinity and water deficit [J]. Pedosphere, 1999, 9(2): 105-112.
- [4] Tauscher R, Dingreiter U, Durst B, et al. Transport processes in narrow channels with application to rotary exchangers [J]. Heat and Mass Transfer, 1999, 35: 123-131.
- [5] Zhang L Z, Jiang Y. Heat and mass transfer in a membrane based enthalpy recovery ventilator [J]. Journal of Membrane Science, 1999, 163(1): 29-38.
- [6] Niu J L, Zhang L Z. Membrane based enthalpy exchanger: material considerations and clarification of moisture resistance [J]. Journal of Membrane Science, 2001, 189(2): 179-191.
- [7] Zhang L Z, Niu J L. Effectiveness correlations for heat and moisture transfer processes in an enthalpy exchanger with membrane cores [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2002, 122(5): 922-929.
- [8] Zhang Y P, Jiang Y, Zhang L Z, et al. Analysis of thermal performance and energy saving effect of membrane based heat recovery ventilator [J]. Energy, 2000, 25(6): 515-527.
- [9] Pieters J G, Deltour J M J J, Debruyckere M J G. Onset of condensation on the inner and outer surface of greenhouse covers during night [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1995, 61(3): 165-171.
- [10] Uzun S, Demir Y, Cemek B. The effect of different roof ventilation gaps and plastic types applied to plastic greenhouse on the growth, development and yield of some vegetable crops [J]. Ondokuzmayis Universitesi, Ziraat Fakultesi Dergisi, 2000, 15(1): 46-55.

(下转 112 页)