

热泵烤烟系统性能的试验研究

吕君^{1,2}, 魏娟^{1,2}, 张振涛¹, 杨鲁伟^{1*}, 李照民³, 杨庆敏³

(1. 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;
3. 嵩县烟草公司, 洛阳 471400)

摘要: 为了研究热泵烤烟的系统特性, 并为工程应用推广提供有价值的参考, 该文设计了一种新型的热泵烤烟系统, 对热泵烤烟进行了试验研究。当烤房内鲜烟装载量为 2 432 kg 时, 压缩机的最大功率为 12.6 kW, 系统制热系数达到了 3.25, 整个过程的除湿能耗比为 2.42 kg/(kW·h)。最后对热泵烤烟和燃煤烤烟的经济性进行了比较, 结果显示得到 1 kg 干烟热泵的烘烤成本为 2.12 元, 而燃煤的烘烤成本为 2.97 元。与燃煤烤烟相比, 热泵烤烟具有明显的节能优势和社会经济效益。

关键词: 烟叶, 干燥, 试验, 烘烤, 热泵, 节能

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.z1.011

中图分类号: S226.6; S572

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-Supp.1-0063-05

吕君, 魏娟, 张振涛, 等. 热泵烤烟系统性能的试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊 1): 63-67.

Lü Jun, Wei Juan, Zhang Zhentao, et al. Experimental study on performance of heat pump system for tobacco leaf flue-curing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(Supp.1): 63-67. (in Chinese with English abstract)

0 引言

烟叶烘烤是一个大量的耗能过程^[1-3], 普通烤房用煤直接供热, 热利用率低, 耗煤量高^[4-5]。而热泵干燥技术 1950 年在美国获得专利权后便以其明显的节能优势在工业领域获得了迅速的应用^[6-8]。因此将热泵干燥技术用于烟叶烘烤, 不仅能够节省能源燃料, 而且可以消除污染物的排放, 利于保护环境。

Bryan 等于 1999 年在美国首次用热泵除湿烤房和常规燃油烤房对烟叶 K326 进行烘烤试验^[9], 研究结果表明用热泵除湿烤房比燃油烤房烘烤得到的烟叶质量要高, 在当时当地的能源开支情况下烘烤成本和后者相比有一定优势。不过此后, 国外其他有关热泵烟叶烘烤的研究成果基本未见报道。

河南农业大学的宫长荣在国内最先开展了热泵烘烤烟叶的研究工作, 他通过研究发现采用热泵加热方式和热风循环的方法烤烟能充分利用热能, 节能效果明显^[10], 而且烟叶烘烤质量也得到了改进和提高。2004 年宫长荣等人在河南农大对热泵型烟叶自控密集烤房和普通燃煤烤房的性能及烘烤后的烟叶品质进行了对比研究^[11], 结果表明热泵烘烤比燃煤烤房的热能利用率高, 烘烤成本低, 烘烤时间少, 得到的烟叶质量好。孙晓军等也进行了热泵烤房

的设计开发和烟叶烘烤试验^[12-13], 结果表明热泵烤房可有效利用空气中的热能替代煤炭进行烟叶烘烤, 而且烤后烟叶质量有较大提高, 烘烤成本明显降低。彭宇等对热泵型太阳能密集烤房的烘烤节能途径进行了探讨^[14], 研究结果表明仅采用热泵烘烤得到 1 kg 干烟耗电量为 3.08 kW·h。然而迄今为止, 已公开的文献对热泵烤烟系统运行特性的研究还很少, 因此本文的主要目的是通过试验研究热泵烤烟过程的系统特性, 为工程应用推广提供有价值的参考。

1 试验装置及试验方法

1.1 试验装置

新型热泵烤烟系统试验装置如图 1 所示, 系统主要由密集烤房、5 匹涡旋压缩机 (2 台)、翅片管式冷凝器、翅片管式蒸发器和电控箱组成, 工质为 R134a 制冷剂。烤房体积为 8 m×2.9 m×3.3 m。墙体是由内嵌 100 mm 厚的岩棉彩钢板搭建而成, 在靠近机组墙壁的上侧和下侧设有新风阀和排湿阀, 在冷凝器的前端安装有功率为 1 kW 的轴流风机 2 台, 总风量为 17 000 m³/h。室外蒸发器为顶出风结构, 距离排湿阀 300 mm, 蒸发器侧风机风量为 8 000 m³/h, 功率为 0.4 kW。

此系统可以实现烤房升温 and 除湿 2 种功能。图 1a 表示的是升温工况, 此时新风阀和排湿阀关闭, 环境空气 (1) 流经蒸发器冷却除湿后变成 2 点状态, 放出的热量被热泵工质吸收后在冷凝器中排出用于加热烤房内的循环空气, 加热后的空气 (3) 和烟叶进行热湿交换变成 4 点状态, 之后返回冷凝器进一步被加热升温, 继而重复下一次循环。当烤房需要排湿的时候开启新风阀和排湿阀 (图 1b), 此时和烟叶进行热湿交换后的部分湿空气 (5) 从排湿口排出, 和环境空气 (6) 混合成 7 点状态的空气, 然后流

收稿日期: 2011-11-29 修订日期: 2012-04-19

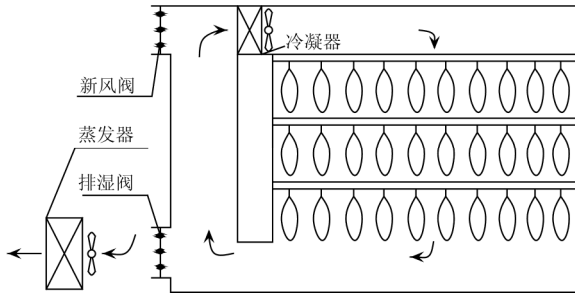
基金项目: 河南省烟草公司资助项目 (20100812)

作者简介: 吕君 (1984-), 男, 湖南邵阳人, 博士生, 主要从事热泵干燥技术方面的研究。北京 中国科学院理化技术研究所, 100190。

Email: junlv2009@gmail.com。

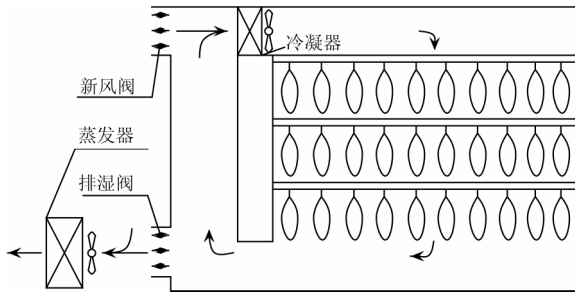
*通信作者: 杨鲁伟 (1970-), 男, 河南鲁山人, 研究员, 博士生导师, 主要从事传热强化和热泵技术方面的研究。北京 中国科学院理化技术研究所, 100190。Email: lwyang2002@yahoo.com.cn。

过蒸发器冷却除湿后状态变成 8 点。同时烤房内和烟叶进行热湿交换后状态为 5 点的另一部分湿空气直接返回至烤房顶部，和环境空气（6）混合成 9 点状态的空气，接着经冷凝器加热后变成 10 点状态，然后和烟叶进行热湿交换，继而重复下一次循环。



1. 蒸发器进口空气 2. 蒸发器出口空气 3. 冷凝器出口空气 4. 和烟叶热湿交换后的空气

a. 升温工况



5. 和烟叶热湿交换后的空气 6. 环境空气 7. 蒸发器进口空气 8. 蒸发器进口空气 9. 冷凝器进口空气 10. 冷凝器进口空气

b. 除湿工况

图 1 升温与除湿工况时的试验系统简图

Fig.1 Schematic diagram of experimental system under heating and dehydrating conditions

1.2 试验条件

热泵烤烟试验于 2011 年 9 月 21 日 19:37 在河南嵩县开始，烤房内装 2 432 kg 鲜烟，分 3 层均匀悬挂。为便于比较，笔者于同一时间还采用普通燃煤烤房进行了一次烤烟试验，装烟量为 3 443 kg，分 4 层均匀悬挂。鲜烟平均含水率为 85%，烟叶品种为豫烟 6 号，类型为中部烟。

1.3 试验方法

按照烤烟三段式烘烤工艺模式提供所需的温湿度条件^[15-17]，热泵烤房中的干球温度通过压缩机的启停进行控制，当烤房内实际温度大于（或小于）工艺要求的目标温度时，压缩机停止（或开始）运行。初始阶段只有一号压缩机工作，当烤房内实际温度无法达到目标温度时，在一号压缩机持续运行状态下，二号压缩机动作，最终满足负荷要求。湿球温度通过调节排湿阀的开关进行控制，当烤房内实际湿球温度大于（或小于）工艺要求的目标湿球温度时，开启（或关闭）排湿阀。燃煤烤房中的干球温度通过加煤和鼓风机的启停进行控制，湿球温度则通过调节新风阀的开度进行控制。

压缩机的进出口布置有温度传感器（热电偶，精度 ± 0.1℃）和压力传感器（GE: PTX-7517, 0~7 MPa, ± 0.25%FS），烤房内上下棚的中部和风机进出口布置有温湿度传感器（JWSK-6 宽温型温湿度变送器，± 0.5℃，±

3% RH），数据采集仪为 MX100，1s 采集一次数据，电量每小时记录 1 次。装烟后利用风速计（testo405-V1, 0~10 m/s, 0~99 990 m³/h, ± (0.3 m/s+5%测量值)）测定烤房内风机开启时的风速和风量。

2 热泵烤烟系统的主要性能指标

2.1 热泵系统的平均制热量

为了考察系统的总供热能力，平均制热量 Q_k 指的是 2 台压缩机同时运行时冷凝器的热负荷，由公式（1）确定

$$Q_k = \dot{m}c(t_o - t_i) \quad (1)$$

式中， c 为流经冷凝器空气的平均比热，kJ/(kg·k)； \dot{m} 为空气的质量流量，kg/s； t_i 、 t_o 分别为流经冷凝器进出口空气的干球温度，℃。

2.2 热泵的制热系数

表征热泵性能的参数为制热系数（coefficient of performance, 简称 COP）^[18-19]，定义为热泵制取的热量与所消耗的驱动能量之比，具体形式为

$$COP = \frac{Q_c}{W_{tot}} \quad (2)$$

式中， Q_c 为冷凝器的热负荷，kW； W_{tot} 为总功率（包括压缩机功率、蒸发器上风机功率以及冷凝器上循环风机功率），kW。

2.3 热泵干燥系统的除湿能耗比

除湿能耗比（specific moisture extraction rate, 简称 SMER）是反映干燥系统综合性能的主要指标，定义为消耗单位能量所除去物料中的水分质量^[20-21]，用公式表示为

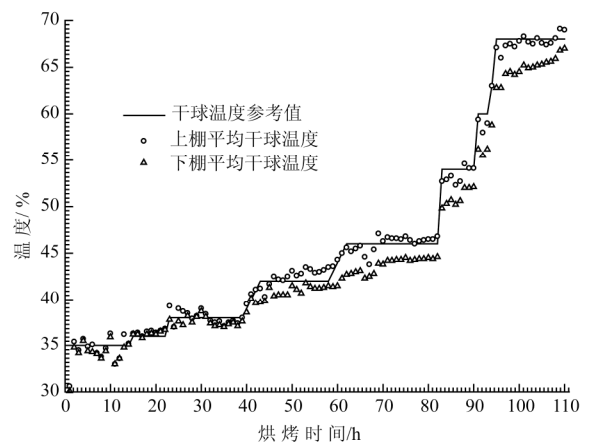
$$SMER = \frac{M_{de}}{W_{tot}\tau} \quad (3)$$

式中，SMER 为除湿能耗比，kg/(kW·h)； M_{de} 为从物料中除去的水分质量，kg； W_{tot} 为总功率，kW； τ 为干燥时间，h。

3 热泵烤烟试验结果与分析

3.1 烤房上下棚温度的均匀性和精确性

图 2a 和图 2b 分别为以开烤时间为 0 时刻每隔 1 h 所记录的烤房上下棚平均干球温度和湿球温度的分布图。



a. 干球温度

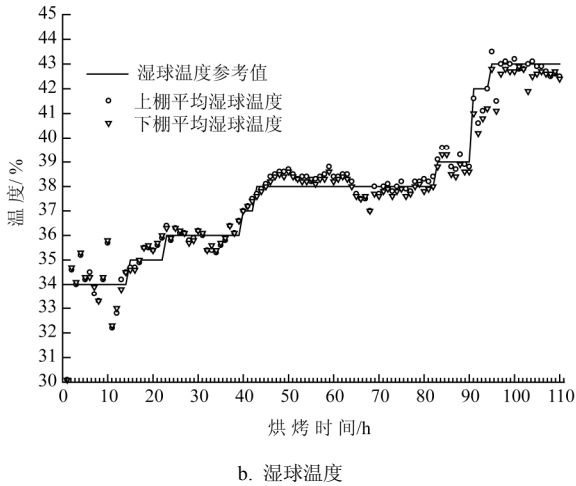


图 2 烘烤过程中烤房内空气干球温度和湿球温度的分布
Fig.2 Dry bulb temperature and wet bulb temperature of air in barn in flue-curing process

从图中可以看出，上下棚最大干球温差为 2.9℃（第 95 h），最大湿球温差为 1.8℃（第 97 h），说明烤房内温度分布比较均匀。此外实测的干球温度和目标参考值相比最大温差为 3.1℃（第 95 h），最大湿球温差为 2.2℃（第 97 h），说明烘烤过程中温控的精确性较高。

3.2 系统的耗电情况

图 3 表示的是系统每小时耗电量随烘烤时间的变化关系，耗电量等于间隔为 1 h 的电表示数之差，主要用电设备为压缩机和室内外风机，其中压缩机和室外风机联动，室内风机在烘烤过程中一直运转。

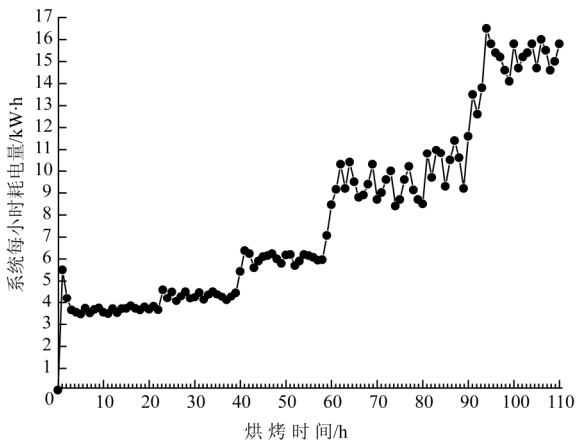


图 3 烘烤过程中系统每小时耗电量
Fig.3 Systematic electricity consumption per hour in flue-curing process

烤烟初始升温阶段一号压缩机持续运行，系统耗电量较大，当烤房内干球温度升至内干球温度升至 35℃时，压缩机进入间歇运行状态。当干球温度继续升至 44℃时二号压缩机也参与工作，到了干筋期的升温阶段（60~68℃），2 台压缩机同时持续运行，压缩机总功耗最大达到了 12.6 kW。

3.3 压缩机的运行特性

试验开始一号压缩机排气温度随烘烤时间的变化关系如图 4 所示。压缩机启动时排气温度为 16.6℃（烤房内温度为 15.1℃），29 min 后达到 44.7℃，升温速率为 1℃/min 左右。此后升温速率降低，再经过 85 min 压缩机排气温度升至 59.5℃，烤房内上棚温度达到设定值 35℃，压缩机停止工作，排气温度迅速下降。

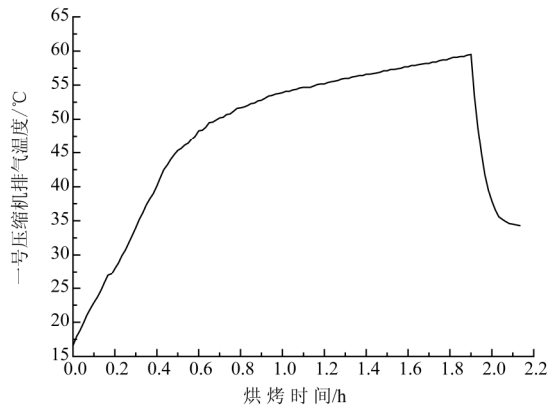


图 4 一号压缩机排气温度随烘烤时间的变化
Fig.4 Variation of discharge temperature of compressor 1 with flue-curing time

3.4 系统的性能特性

烘烤过程中各稳温段压缩机工况和系统性能如表 1 所示，在变黄期随着烤房内空气温度的升高，压缩机的总功率不断增加，系统制热量不断减少，导致系统的 COP 不断降低。在 42℃时 COP 减至 2.82 是由于烤烟的特殊工艺需要，选用了功率较大的室内风机（约占系统总功耗的 40%）。

到定色期二号压缩机也参与工作，当烤房内空气干球温度升至 46℃时压缩机总功率、系统平均制热量和 COP 都明显增加。随着烘烤时间的进行，烤房内空气温度的进一步升高，压缩机总功率不断增加，系统制热量和 COP 不断减小。

表 1 稳温段压缩机工况和系统性能

Table 1 Compressor operating conditions and system performance at stable temperature stages

工艺与系统性能	变黄期		定色期		干筋期			
稳温段干球温度/℃	35	36	38	42	46	54	60	68
一号压缩机运行时平均功率/kW	2.74	2.8	2.93	3.2	3.5	4.21	4.85	5.75
二号压缩机运行时平均功率/kW	0	0	0	0	3.43	4.15	4.8	5.71
两台压缩机总功率/kW	2.74	2.8	2.93	3.2	6.93	8.36	9.65	11.46
系统的平均制热量/kW	16.5	16.4	16.2	15.8	30.3	29.1	28.2	26.6
系统总制热系数 (COP)	3.21	3.15	3.04	2.82	3.25	2.7	2.34	1.92

4 经济性比较

燃煤和热泵烤烟试验的基本情况和经济成本见表 2 所示。由于燃煤烤房和热泵烤房的装烟棚数分别为 4 棚和 3 棚, 加上冷凝器占用部分装烟室空间, 所以热泵烤房比燃煤烤房的装烟量要少。但从表 2 数据可知, 得到 1 kg 干烟热泵烘烤比燃煤烘烤的成本低 0.85 元, 因此热泵烤烟的经济效益显著。此外烟叶烘烤质量也得到了改进和提高, 且减少了大量的环境污染, 所以热泵烤烟具有广泛的应用价值和前景。

由表 2 可知本次热泵烤烟试验过程的脱水量为 2 122 kg, 用电量为 877 (kW·h), 易得系统的 SMER 为 2.42 kg/(kW·h), 说明平均消耗 1 度电能够从烟叶中脱去 2.42 kg 水分, 系统节能优势明显。随着国家节能减排环保政策的加强, 热泵烤烟有望应用于大规模的工业化生产。

表 2 热泵烤烟和燃煤烤烟的经济性比较

Table 2 Economic comparison for curing tobacco between with heat pump and with coal stove

项目	燃煤烤房	热泵烤房
烘烤时间/h	120	110
装烟竿数	425	304
每竿鲜烟平均质量/kg	8.1	8
总装烟量/kg	3443	2432
烘烤后每竿干烟平均质量/kg	0.96	1.02
烘烤后干烟总质量/kg	408	310
脱水量/kg	3035	2122
用煤量/kg	1178	0
当地 1t 煤价/元	880	880
每炕用煤成本/元	1037	0
用电量/(kW·h)	236	877
每度电价/元	0.75	0.75
每炕用电成本/元	177	658
1kg 干烟的烘烤成本/元	2.97	2.12

5 结论

1) 本文对一种新型的热泵烤烟系统进行了试验研究, 该系统具有结构简单, 控制方便, 成本较低等优点。试验结果表明: 烤房内温度分布的均匀性良好、温控的精确性较高。2 台压缩机在烘烤过程中间歇运行, 在干筋期前期升温过程中压缩机总功率达到了 12.6 kW, 系统制热系数达到了 3.25, 整个过程的除湿能耗比为 2.42 kg/(kW·h), 节能效果明显。

2) 以目前河南嵩县的煤电价格来看, 热泵系统比燃煤系统烘烤得到 1 kg 干烟的成本低 0.85 元, 因此热泵烤烟具有显著的经济效益和社会效益。

[参 考 文 献]

[1] Kadete H. Energy conservation in tobacco curing[J]. Energy, 1989, 14(7): 395—435.
 [2] Siddiqui K M. Analysis of a Malakisi barn used for tobacco curing in East and Southern Africa[J]. Energy Conversion and Management, 2001, 42(7): 483—490.

[3] 刘国顺. 中国烟叶生产实用技术指南[M]. 中国烟草公司, 2008.
 [4] North Carolina State University. Flue-cured tobacco guide 2011[EB/OL].[2011-10-27].http://ipm.ncsu.edu/Production_Guides/Flue-cured/flue_cured.pdf.
 [5] David M P, Marvin G R, Mike E, et al. Formation of tobacco specific nitrosamines in flue-cured tobacco[C]// Tobacco Science Research Conference, University of California, San Francisco, 1999.
 [6] Neslihan C, Hepbasli A. A review of heat pump drying: Part 1- Systems, models and studies[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(9): 2180—2186.
 [7] Neslihan C, Hepbasli A. A review of heat pump drying: Part 2-Applications and performance assessments[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(9): 2187—2199.
 [8] 陈东, 谢继红. 热泵干燥装置[M]. 化学工业出版社, 2006.
 [9] Bryan W, Maw J, Michael M, et al. Heat pump dehumidification during the curing of flue-cured tobacco[C]// The Proceedings of the 41st Tobacco Workers' Conference, Nashville, Tennessee, 2004.
 [10] 宫长荣, 潘建斌. 热泵型烟叶自控烘烤设备的研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 155—158.
 Gong Changrong, Pan Jianbin. Heat pump type of autocontrol equipment for tobacco leaf flue-curing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(1): 155—158. (in Chinese with English abstract)
 [11] 潘建斌, 王卫峰, 宋朝鹏, 等. 热泵型烟叶自控密集烤房的应用研究[J]. 西北农林科技大学学报, 2006, 34(1): 25—29.
 Pan Jianbin, Wang Weifeng, Song Chaopeng, et al. Applied research on heat pump type of autocontrol bulk curing barn for tobacco leaf[J]. Journal of northwest sci-tech university of agriculture and forestry.2006, 34(1): 25—29. (in Chinese with English abstract)
 [12] 孙晓军, 杜传印, 孙其勇. 热泵型烤房的设计开发[C]. 山东省制冷空调学术年会论文集, 2009.
 [13] 孙晓军, 杜传印, 王兆群, 等. 热泵型烟叶烤房的设计探究[J]. 中国烟草学报, 2010, 16(1): 31—35.
 Sun Xiaojun, Du Chuanyin, Wang Zhaoqun, et al. Investigation into the design and development of heat pump equipped tobacco leaf bulk curing-barn[J]. Acta Tabacaria Sinica.2010, 16(1): 31—35. (in Chinese with English abstract)
 [14] 彭宇, 王刚, 马莹, 等. 热泵型太阳能密集烤房烘烤节能途径探讨[J]. 河南农业科学, 2011, 40(8): 215—218.
 Peng Yu, Wang Gang, Ma Ying, et al. Discussions on energy saving ways of heat pump and solar energy bulk curing barn[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences. 2011, 40(8): 215—218. (in Chinese with English abstract)
 [15] 宫长荣, 周义和, 杨焕文. 烤烟三段式烘烤导论[M]. 科学出版社, 2006.
 [16] 宫长荣. 烟草调制学[M]. 中国农业出版社, 2003.
 [17] 江凯. 烤烟密集烘烤技术[M]. 中国农业出版社, 2010.
 [18] 伊松林, 张璧光. 太阳能及热泵干燥技术[M]. 化学工业出版社, 2011.

- [19] 丛海花, 薛长湖, 孙妍. 热泵-热风组合干燥方式对干制海参品质的改善[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 342—346. Cong Haihua, Xue Changhu, Sun Yan, et al. Quality improvement of dried sea cucumber by combined heat pump and hot air method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(5):342—346. (in Chinese with English abstract)
- [20] 张玉荣, 周显青. 热风和真空干燥玉米的品质评价与指标筛选[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 346—352. Zhang Yurong, Zhou Xianqing. Quality evaluation and parameter selection of maize by hot-air and vacuum drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(3): 346—352. (in Chinese with English abstract)
- [21] 倪超, 李娟玲, 丁为民, 等. 全封闭热泵干燥装置监控系统的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 134—139. Ni Chao, Li Juanling, Ding Weimin, et al. Design and experiment of monitoring system for heat pump dryer of enclosed cycles[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(10): 134—139. (in Chinese with English abstract)

Experimental study on performance of heat pump system for tobacco leaf flue-curing

Lü Jun^{1,2}, Wei Juan^{1,2}, Zhang Zhentao¹, Yang Luwei^{1*}, Li Zhaomin³, Yang Qingmin³

(1. Technical institute of physics and chemistry of CAS, Beijing 100190, China; 2. Graduate university of CAS, Beijing 100049, China; 3. Songxian tobacco company, Luoyang 471400, China)

Abstract: In order to study the characteristic of heat pump system for tobacco leaf flue-curing and provide valuable reference for engineering application and extension, a new heat pump system which had a simple structure, easy controlling and low cost for tobacco leaf flue-curing was designed. Then the experimental performance of such system was investigated. When the quantity of fresh tobacco loaded in the barn was 2 432 kg, the results of the experiment indicated the maximum power consumption of compressor was 12.6 kW; that the coefficient of performance (*COP*) reached 3.25; and the specific moisture extraction rate (*SMER*) of heat pump system for tobacco leaf flue-curing was 2.42 kg/(kW·h) during the whole curing process. Finally an economic comparison for curing tobacco between with heat pump and with coal stove was made. The curing cost for 1 kg dry tobacco leaves was 2.12 Yuan with heat pump and 2.97 Yuan with coal stove. Comparing with coal stove, heat pump system for tobacco leaf flue-curing has advantage in energy saving and remarkable social and economic benefits.

Key words: tobacco, drying, experiments, flue-curing, heat pump, energy saving