

热泵型烟叶自控烘烤设备的研究

宫长荣, 潘建斌

(河南农业大学)

摘要: 针对我国烟叶烘烤设备陈旧落后, 耗煤量高, 环境污染重, 且难于保证烟叶烘烤质量问题, 利用热泵加热和冷凝除湿原理, 采用微电脑程序控制温、湿度, 设计建造了热泵加热式温、湿度自控烟叶烘烤设备。试验检测结果表明, 装烟室内温湿度环境和烟叶变化均衡, 烘烤 1kg 干烟叶平均耗电量约为 2 kW/h, 冷凝除湿效率达 15% 左右, 工作过程不产生废气、废水, 能有效提高烟叶烘烤质量, 社会效益和环境效益显著。

关键词: 热泵加热; 烟叶烘烤; 自控

中图分类号: S226.6; S572

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2003)01-0155-04

1 引言

烟草原料质量是卷烟质量的基础和最重要的限制因素。目前, 我国烟草原料生产最突出最关键的问题是香气品质和上等烟比例不能满足卷烟工业的需求, 其中烘烤加工设备和工艺条件起着十分重要的作用。近几年的研究和实践证明, 由于烘烤设备陈旧落后, 加工工艺不能得到保证, 造成烟叶质量和烟农损失有 25% ~ 30%。

我国的烟叶烘烤设备, 长期沿用传统的土木结构自然通风式烤房, 尽管经常有某些改进改造^[1,2], 但仍然没有脱离传统的形式。世界烤烟生产先进的国家, 包括美国、加拿大等, 普遍使用以燃油或天然气为能源的密集烘烤设备^[3], 并正向电脑程序化控制方向发展。我国自 20 世纪 90 年代引进以燃油、燃煤直接供热和锅炉供热的密集烘烤设备, 如“烤霸”、“金果实”等, 在各地试验示范反应了烘烤操作技术简便、节省用工、能保证烟叶烘烤质量等优势, 但一次性投资成本较高, 耗油量较大, 近期内要大面积推广有很大难度, 实践证明不适合我国国情, 不能为生产接受。

然而, 随着农业种植结构的调整, 烤烟规模化种植、规范化栽培、产业化生产和标准化管理已经成为我国烤烟生产的新形势、新动向, 种烟 10~30 亩(1 亩=1/15 hm²) 左右的农户、200~500 亩左右的产业化农场、烟草科教园区、紧密型厂办基地等近几年已经开始快速发展, 这使规模化、工厂化烘烤加工有了很好的基础, 迫切需要研究相应的烘烤加工设备。

烟叶烘烤是一个大量耗热过程, 普通烤房用煤直接供热, 热利用率低, 耗煤量高, 通常烤干 1 kg 烟叶耗煤量在 1.5~2.5 kg 标煤^[3], 环境污染严重。电能作为一种安全、高效、清洁的能源, 具有传输方便, 控制容易, 无污染

等优点, 一度使用成本较高。但是随着我国电力产业的快速发展, 特别是长江三峡水电站投入使用后, 电力资源会越来越富裕。参考热泵供热技术方面的研究^[3~6], 以及在木材、蔬菜加工方面进行的试验研究^[7~11]。我们采用热泵原理, 研制了热泵加热、热风循环、冷凝除湿、温湿度自控的烟叶烘烤设备。

2 原理与方法

2.1 热泵加热原理

为提高热效, 采用热泵加热原理。热泵加热系统由压缩机、冷凝器、蒸发器、膨胀阀组成。

其工作原理为: 根据热力学第二定律, 设备从低温热源 T_2 吸热 Q_2 , 外界对系统做功 A , 向高温热源放热 Q_1 。

制热系数为:

$$\epsilon = Q_1/A = Q_1/(Q_1 - Q_2) = T_1/(T_1 - T_2)$$

高温热源温度 $t_1 = 38 \sim 68$, 低温热源温度 $t_2 =$

30。

$$\text{即: } T_1 = t_1 + 273 = 311 \sim 341 \text{ K}, T_2 = t_2 + 273 =$$

$$303 \text{ K}, \epsilon = T_1/(T_1 - T_2) = 9 \sim 39$$

考虑各项损失, 实际制热系数约为: $\epsilon = 4 \sim 8$

2.2 除湿原理

为最大可能的利用热能, 避免排湿时将大量热量排放出去, 我们采用冷凝排湿系统^[3]代替进风口、排湿口进行除湿。冷凝排湿系统由冷凝器、接水盘、排水管组成, 起到以冷凝水形式排湿作用, 如图 1 所示。

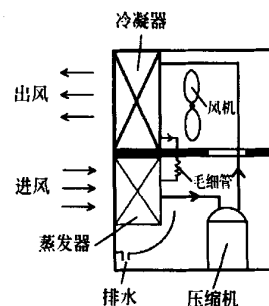


图 1 冷凝排湿系统

Fig. 1 System of vapour condensation to dehumidification

收稿日期: 2001-10-08

基金项目: 国家烟草专卖局资助项目(982022); 专利申请号 99116559.4

作者简介: 宫长荣(1948-), 河南农业大学物理系教授, Email: hnddz180@yahoo.com.cn; 潘建斌(1962-), 副教授, 郑州市河南农业大学物理系, 450002, Email: panjb01@163.com

湿空气在风机吸引下从除湿机进口进入,首先与蒸发器接触,进行热交换。由于蒸发器的温度低于空气的露点温度,所以在冷却空气的过程中,空气中所含的水分将被冷凝出来,从蒸发器下部的接水盘排出。空气再流经冷凝器吸热,使温度升高到高于进蒸发器的空气温度,使相对湿度大大降低。

空气流经除湿机时,温度 t , 含湿量 d 及相对湿度 φ 的变化如图 2 所示。

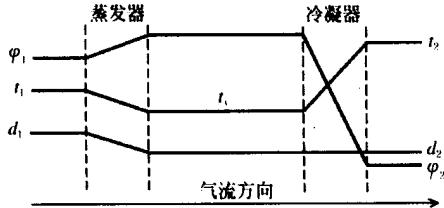


图 2 除湿机除湿时, 温度 t , 含湿量 d 及相对湿度 φ 的变化关系
Fig. 2 Variation relation of the temperature t , moisture content d and relative humidity φ when the dehumidifier works

空气在除湿机中的处理过程如图 3 所示。图中点 1 表示蒸发前待处理的空气, 点 x 表示蒸发器后, 冷凝器前空气的状态。直线 1— x 表示空气通过蒸发器时的热湿交换过程, 此过程中, 空气的焓值与含湿量均下降。点 2 表示空气流经冷凝器后的空气状态。1— x 线延长后与饱和线的交点表示与蒸发器外表面平均温度 t_{w0} 相对应的饱和湿空气的状态。

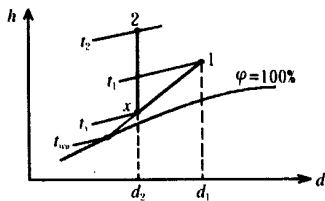


图 3 空气在除湿机中的处理过程
Fig. 3 Handling process of air in the dehumidifier

2.3 装烟室及产热、除湿、通风设计

烟叶烘烤设备由装烟室、热泵加热系统、冷凝排湿系统、温湿度自动控制系统组成。装烟室采用 100 mm 聚氨酯彩钢夹心板作, 保温性能良好, 生产中可采用土木结构。设一个装料门, 一个维修门, 4 个排湿口, 2 个观察窗, 如图 4 所示。

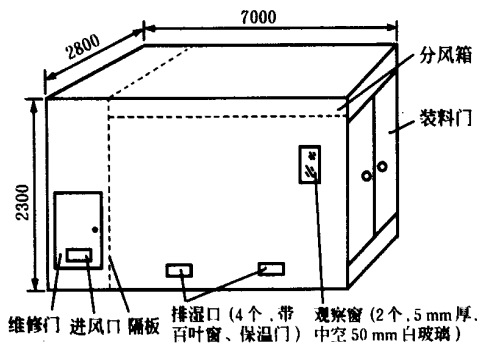


图 4 装烟室结构

Fig. 4 Construction of the heat preservative box
装烟室内平面面积为 $6.0 \times 2.8 \text{ m}^2$, 高 2.3 m, 分上

下两层装挂烟叶, 一次可装鲜烟叶 2 500 kg 左右。鲜烟叶含水率一般 85% ~ 90% (按 88% 计算), 按烟叶烘烤工艺要求, 烟叶干燥过程中最大失水速度为 1.5% /h, 烟叶在正常烘烤过程平均汽化蒸发 1 kg 水分需热量为 $2.6 \times 10^3 \text{ kJ}$ 。

烤烟需热量和供热量衡算:

1) 鲜烟水分: $G_1 = 2500 \text{ kg} \times 88\% = 2200 \text{ kg}$

最大排湿汽化排除: $G_2 = 2200 \text{ kg} \times 1.5\% / \text{h} = 33 \text{ kg/h}$

2) 水分汽化需热: $Q_1 = 33 \text{ kg/h} \times 2.6 \times 10^3 \text{ kJ/kg} = 8.58 \times 10^4 \text{ kJ/h}$

有效热利用率 70%, 需热量: $Q_2 = 8.58 \times 10^4 \text{ kJ} \div 70\% = 1.23 \times 10^5 \text{ kJ/h}$

设计供热能力: $1.5 \times 10^5 \text{ kJ/h}$ 。

根据烤烟过程热量衡算结果, 加热设备采用 5 匹 Copland 涡旋式压缩机两台, 风冷冷凝器、蒸发器, A1co 热力膨胀阀。在变黄期和定色期, 由于保温箱内外温差小, 加热设备效率高, 开启一台加热设备; 在干筋期由于保温箱内外温差大, 加热设备效率相对低, 开启两台加热设备。

除湿设备采用 1 匹转子式压缩机两台, 风冷冷凝器、蒸发器, 毛细管。

通风设备采用高效节能的 T35 系列 7.1 号风机, 最高转速为 960 r/min, 叶角 35°, 最大风量为 $17.296 \text{ m}^3/\text{h}$, 最大风压为 167 Pa, 考虑到烟叶变黄期、定色期、干筋期的需风量不同, 选用双速风机, 电机功率 1.1/0.75 kW, 6/8 极, 可达到较好的节能效果。

3 结果与分析

3.1 装烟室温湿度状况

热泵温、湿度自控烟叶烘烤设备箱体内的烟叶受外界影响较小, 温度保持均衡, 在烟叶变黄阶段为 ± 0.5 , 定色阶段为 ± 1 , 干筋阶段为 ± 0.5 , 表 1 是烟叶烘烤不同阶段几个代表性检测点的温度值。从表 1 中可以看出, 在加热过程中, 装烟室内的温度波动范围很小, 各部位基本上不存在温度梯度。这就有利于烟叶烘烤工艺条件的落实, 并保证装烟室内烟叶变化的均衡一致。

表 1 烘烤各阶段烤烟室温湿度变化

Table 1 Variation of temperature and humidity of the tobacco leaf flue-curing room in the each stage

	变黄期			定色期			干筋期		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
干球温度/	37.5	38	38.5	54	53.5	55	67.5	67	67.5
湿球温度/	35	36	36	38	40	39	42	41	42.5

3.2 在不同烘烤阶段加热设备工作周期

由于装烟室密封性好, 因此能很好的保温保湿, 整个烟叶烘烤过程中从低温到高温, 热泵一般工作 5~ 8 m in, 然后自行停机 120 m in 到 20 m in (如表 2)。而且室内温度比较稳定, 当箱内与外界的温差变大时, 加热设备

的工作频率增加, 而工作时间基本稳定, 装烟室内温度不会出现较大幅度的波动和过低、过高的现象, 从而从根本上避免了烤青和挂灰现象的产生。

表 2 热泵工作周期

Table 2 Working cycle of heat pump

	热泵工作时间/m in	热泵工作周期/m in
变黄期	5~ 7	120
定色期	5~ 8	40
干筋期	5~ 8	20

3.3 系统工作效率

热泵温湿度自控烟叶烘烤设备采用热风循环和冷凝除湿装置, 在冷凝过程中, 水分从气态变为液态, 释放大量的热, 而且装烟时有良好的隔热能力, 基本上不与外界发生热交换, 热量不易散失或漏失因此整个系统热能利用率高。1 kW 电能可产生相当于正常条件下 4~ 8 kW 的电能产生的热能, 烘烤每千克干烟叶平均耗电量约为 2 kW · h。试验检测结果 (表 3), 烤干 1 kJ 烟叶耗电量为 2 kW · h 左右, 过程中共排除水分 6 kg, 折合排除 1 kG 烟叶水分的耗能量为 1 200 kJ, 是普通烤房排除 1 kg 水分耗能量 (2 600 kJ) 的 40%。

表 3 烟叶烘烤过程用电量

Table 3 Power consumption in the process of tobacco leaves flue-curing

处理	炕次	耗电量	平均耗电量
		/(kW · h) · kg ⁻¹ (干烟叶)	/(kW · h) · kg ⁻¹ (干烟叶)
热泵加热	1	2.1	2.0
	2	2.0	
	3	1.9	

通过称量鲜烟质量 m_1 , 干烟质量 m_2 , 冷凝排水质量 m_3 , 可计算各阶段冷凝除湿的工作效率公式为: $\eta = \frac{m_1 - m_2}{m_3} \%$ 。据试验检测结果 (表 4), 冷凝除湿效率达 15% 左右。其中烟叶在定色期由于烟叶蒸发快, 而烤箱内相对湿度较低, 冷凝排湿效果比变黄期要差, 需打开排湿孔 10 h 左右。

表 4 各阶段冷凝除湿的工作效率

Table 4 Efficiency of vapour condensation to dehumidification in each stages %

炕次	变黄期	定色期	干筋期	总计
1	7.30	5.61	2.81	15.72
2	6.73	6.24	1.31	14.28
3	7.41	6.92	0.99	15.32

3.4 烘烤后烟叶的化学成分

由于热泵装烟室密封性好, 烟叶在烘烤过程中呼吸作用释放的 CO₂ 增加了箱内 CO₂ 的含量, 有利于烟叶变黄和致香物质的形成^[12], 而且室内温、湿度均匀, 通风排湿顺畅, 有利于烟叶变黄更充分时再转入定色, 因此有利于提高烟叶品质。烘烤试验结果表明, 采用热泵温湿度自控烟叶烘烤设备烘烤的烟叶与采用普通烤房烘烤的烟叶相比, 还原糖稍有增加, 烟碱、总氮和蛋白质含量都有明

显下降 (表 5), 这使得烟叶主要化学成分的比例更处于协调, 对改善烟叶的香吃味、减少刺激性和杂气都十分有利。

表 5 烘烤后烟叶的化学成分

Table 5 Variation of the tobacco leaves chemical composition after flue-curing %

烘烤设备	还原糖	烟碱	总氮	蛋白质
热泵自控烘烤设备	18.2	2.45	1.58	7.12
对照烘烤设备	17.8	2.52	1.61	7.35

3.4 采用不同加热干燥方式费用比较

每产生 10 000 kJ 热量费用计算如下:

1) 用电加热烘烤: 耗电量为 $P = Q/3600 = 10000/3600 = 2.78 \text{ kW} \cdot \text{h}$

电费为 $2.78 \text{ kW} \times 0.50 \text{ 元/kW} = 1.39 \text{ 元}$

2) 燃气加热烘烤: 燃气量 $H = Q/(14600 \times \eta) = 10000/(14600 \times 70\%) = 0.98 \text{ m}^3$, 费用为 $0.98 \text{ m}^3 \times 0.8 \text{ 元/m}^3 = 0.78 \text{ 元}$

3) 燃油加热烘烤: 需油量 $H = Q/(45000 \times \eta) = 10000/(45000 \times 80\%) = 0.28 \text{ kg}$

费用为 $0.28 \text{ kg} \times 2.4 \text{ 元/kg} = 0.67 \text{ 元}$

4) 用煤加热烘烤: 需煤量 $H = Q/20900 \times \eta = 10000/(20900 \times 40\%) = 1.20 \text{ kg}$

费用为 $1.20 \text{ kg} \times 0.2 \text{ 元/kg} = 0.24 \text{ 元}$

5) 用热泵加热烘烤: (制热系数 $\epsilon_i = 4$)

功率为 $P = Q/(3600 \times \epsilon_i) = 10000/(3600 \times 4) = 0.69 \text{ kW}$

电费为 $0.69 \text{ kW} \times 0.50 \text{ 元/kW} = 0.35 \text{ 元}$

从以上计算可知, 用煤费用最低, 但普通燃煤烤房自动控制困难, 烘烤质量不高, 且产生大量有害气体, 污染环境; 用锅炉则造价过高, 而且也需要较多电能; 用燃油、燃气烤房使用费用太高; 用电热丝使用费用更高。因此, 热泵加热方式有显著的经济效益。若制热系数达到 $\epsilon_i = 8$, 则可与燃煤费用相当。

4 结论与讨论

试验结果表明, 采用热泵加热方式和热风循环的方法充分利用热能, 并配合冷凝除湿方式排除冷凝水, 一方面有效地提高了热能利用率, 节能效果很明显。从电—热转化角度看, 1 kW 电能可产生相当于正常条件下 4~ 8 kW 的电能产生的热能。试验结果, 烘烤 1 kg 干烟叶平均耗电量约为 2 kW · h, 冷凝除湿效率达 15% 左右, 而且不产生废气、废水, 有显著的社会和环境效益。另一方面, 烟叶烘烤质量也得到改进和提高。

热泵温、湿度自控烟叶烘烤设备是一种多功能的烘干设备, 除烘烤烟叶外, 还可以根据多种农特产品特点和干燥需要设计工艺模式, 实现烘干, 如香菇、木耳、蔬菜、粮食、中药材等。

与国内外燃油、锅炉烤烟房对比, 热泵自控烘烤设备与它们建造成本相当或更低, 使用成本只有燃油密集烤

房的 50%，且减少了大量的环境污染，也不象锅炉供热烤房那样需要水处理等复杂管理程序。所以，热泵自控烘烤设备具有广泛的应用价值和前景。

[参 考 文 献]

- [1] 宫长荣, 李 锐, 张明显等. 烟叶普通烤房部分热风循环的应用研究[J]. 河南农业大学学报, 1998, (2): 32~ 36
- [2] 刘奕平, 张仁椒, 许锡祥. M Y-1 型双炉烤房安装与烘烤实验初报[J]. 中国烟草科学, 1998, (2): 21~ 23
- [3] David M Peele, Marvin G Riddick, Mike E Edwards, et al Tobacco Company, Avoca Division, Merry Hill, NC, 27957, and Jeff S Gentry and Timothy B. Nestor, R. J. Reynolds Tobacco Company, Winston-Salem, NC, 27102
- [4] 姚立为. 制冷与热泵系统能源利用效率的探讨应用[J]. 能源技术, 2000, (1): 1~ 2
- [5] 金苏敏, 李庆生, 沈绍业. 热泵干燥箱的干燥过程[J]. 南京化工大学学报(自然科学版), 1996, (S1): 102~ 105
- [6] 张永贵等. 热泵定义及效率计算方法探讨[J]. 节能与环保, 2001, (2): 16~ 18
- [7] 谢拥群, 张壁光, 常建民等. 多功能木材干燥机的研制与实验[J]. Forestry Studies in China, 2001, (2): 60~ 64
- [8] 陈坤杰. 热泵干燥技术的应用现状与展望[J]. 农业机械学报, 2000, (3): 109~ 111
- [9] 李云林. 热泵干燥在食用菌加工中的应用[J]. 中国食用菌, 1999, (3): 38~ 40
- [10] 李远志. 热泵干燥技术在脱水蔬菜加工中的应用研究[J]. 食品工业科技, 1998, (5): 7~ 8
- [11] 陆 蒸. 毛竹笋热泵干燥特性及制品复重率[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2002, (1): 117~ 120
- [12] 韩锦峰, 宫长荣. 改善烘烤环境的气体成分对烘烤的效应[J]. 河南农业大学学报, 1986, (4): 389~ 396

Heat pump type of autocontrol equipment for tobacco leaf flue-curing

Gong Changrong, Pan Jianbin

(Department of Physics, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Out-dated curing facilities brought about the waste of coal, environmental pollution, and unreliable tobacco quality. A heat pump type of tobacco leaf flue-curing equipment was designed and built with the added concern that temperature and humidity would be controlled by a microcomputer. Heat is generated by a heat pump and it is dehumidified by vapor condensation. The results of the experiment indicated that the changes of temperature and humidity of the curing room and that of the tobacco leaves were identical. The average power consumption was roughly 2 kW · h for flue-curing 1 kg dry tobacco leaves. The efficiency of dehumidification by vapour condensation was about 15%. The process does not produce waste steam or water, which improves the quality of flue-cured tobacco and produces remarkable social and environmental benefits.

Key words: heat pump; tobacco leaf flue-curing; autocontrol