

平行送风食用菌干燥装置效益分析

姚喻晨^{1,2}, 徐丽花^{1,2}, 毛一名^{1,2}, 黄 虎^{1,2}, 张忠斌^{1,2}

(1. 南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210042)

(2. 江苏省能源系统过程转化与减排技术工程实验室, 江苏 南京 210042)

[摘要] 提出了一种平行送风食用菌干燥装置, 与传统干燥方式对比, 进行效益计算. 本装置采用梯级加热模式, 通过平行送风、太阳能预热和同步热泵的引用降低装置能耗, 提高效益. 以香菇干燥为例, 本装置与普通热泵干燥及传统燃煤干燥相比, 能耗之比为 0.42:0.67:1, CO_2 、 NO_x 、 SO_x 排放之比为 0.42:0.67:1, 运行维护费之比为 0.93:1.35:1.

[关键词] 平行送风, 干燥装置, 食用菌, 能耗计算, 效益分析

[中图分类号] TF351.4 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2014)03-0048-04

Benefits Analysis of a Parallel Air Supply Drying Device for Mushroom

Yao Yuchen^{1,2}, Xu Lihua^{1,2}, Mao Yiming^{1,2}, Huang Hu^{1,2}, Zhang Zhongbin^{1,2}

(1. School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

(2. Engineering Laboratory of Energy System Conversion and Emission Reduction of Jiangsu Province, Nanjing 210042, China)

Abstract: In this paper, one kind of parallel air supply drying mushroom-type device is presented and benefits calculation is put forward by comparing with the traditional drying methods. The method of step-by-step heating technology is adopted, using solar to preheat, synchronous pump to heat and auxiliary electricity to finish heating so that the energy consumption can be reduced, which effectively increases benefits. The paper takes shiitake fungus for example, compares with the conventional heat pump and coal-fired drying, the ratios of this kind of device and the former one is presented, of which energy consumption is 0.42:0.67:1, emissions of CO_2 、 NO_x 、 SO_x is 0.42:0.67:1 and operation and maintenance costs is 0.93:1.35:1.

Key words: parallel air supply, device for drying, mushroom, energy consumption calculation, benefits analysis

20 世纪 90 年代, 热泵技术引入干燥领域, 不可再生能源大量消耗、生态环境遭到破坏和食品卫生状况较差等现象得到了明显的改善^[1]. 进入 21 世纪, 以节能减排为特色的太阳能干燥技术受到普遍关注, 但因其受环境因素的影响较大而未能得到推广^[2-4]. 近年来, 冷冻干燥、微波干燥等新兴技术的采用虽然可以使干燥时间大大削减、干燥品质有所提高, 但因费用较高而未能得到广泛使用^[5].

本文描述的食用菌干燥装置, 采用梯级加热模式, 通过平行送风、太阳能预热和同步热泵的引用降低装置能耗, 以香菇为例, 对食用菌干燥装置节能减排效果进行了理论计算. 根据能量守恒原则, 基本能耗计算分为围护结构传热能耗和香菇干燥能耗两部分. 香菇干燥热负荷分香菇升温负荷和香菇中水分蒸发负荷两部分, 所求负荷为一个阶段的总负荷对时间的平均值. 按照 0.33 kg(标煤)/(kW/h) 折算, 普通热泵干燥能耗和传统燃煤干燥能耗对比, 分别节能 37.29% 和 57.88%, CO_2 、 NO_x 、 SO_x 排放量减少, 节能减排效果显著, 对提高食用菌干燥产业效益具有一定的现实意义. 通过计算分析, 验证了本文所采用方法的可行性, 对实际工程应用具有一定参考价值.

1 装置描述

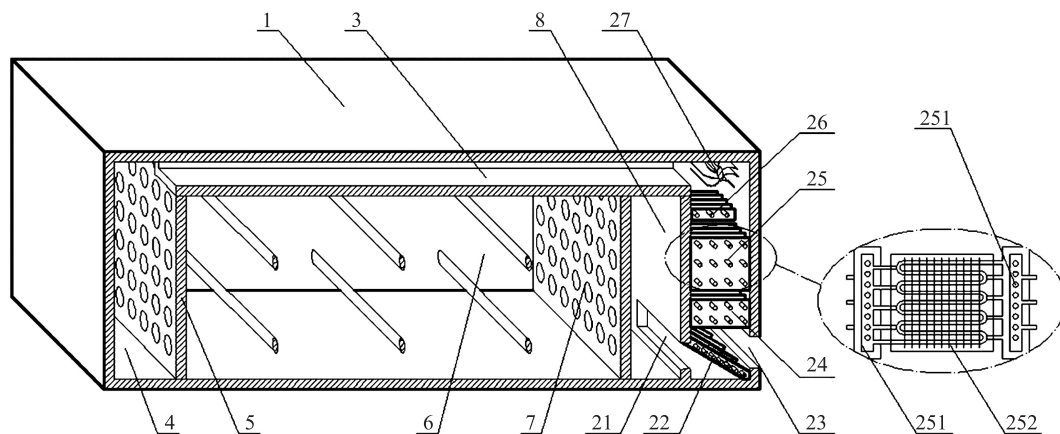
如图 1 所示, 本装置由除湿蒸发器、太阳能预热装置、同步热泵冷凝器、辅助电加热、送风机、送风管、

收稿日期: 2014-04-28.

基金项目: 江苏省产学研前瞻性项目 (BY2014001-02)、南京师范大学科技成果转化基金 (2013-07).

通讯联系人: 张忠斌, 博士, 实验师, 研究方向: 制冷空调设备性能优化和试验新方法. E-mail: zhangzhongbin@163.com

送风静压空间、干燥区域和回风静压空间相互连接组成。



1. 围护结构;21. 回风口;22. 除湿蒸发;23. 新风口;24. 太阳能预热装置;25. 同步热泵冷凝器;251. 集气分液装置;252. 蛇形盘管;26. 辅助电加热;27. 风机;3. 送风管;4. 送风静压空间;5. 送风孔板;6. 干燥区域;7. 回风孔板;8. 回风静压空间

图1 食用菌干燥装置原理图

Fig.1 Mushroom drying device schematics

干燥区域与送、回风静压空间通过多孔板隔离,孔板孔口直径 $\Phi 5$,开孔率 19.6%.通过送风孔板的平行送风和回风孔板的平行回风的送回风方式,将传统动压送风转变为静压送风,保证了送风气流的均匀性.运行时热风在干燥区域内平行流动,气流组织较好,达到降低送风温度、缩短干燥时间、提升干燥品质的效果.

采用太阳能预热装置,充分利用可再生能源,大幅降低干燥能耗,减少环境污染.此外,太阳能预热装置为普通的热水系统,简单可靠.与太阳能光伏发电制热相比,避免了光-电-热转换效率低的问题,且制造过程更加节能环保、运行更加稳定.

常规大型热泵烘烤房预热段由几套热泵系统并联组成,而本装置采用统一的冷凝换热器及内外双管嵌套的集气分液结构,实现了多组热泵制冷剂之间的工质交换,消除了运行时工质热力性质之间的差异,有利于空气处理的均一性,为平行送风创造基础性条件,同时由于换热效率提升使得干燥能耗进一步降低.

新风和回风混合后依次通过太阳能预热装置、同步热泵冷凝器和辅助电加热,达到预设温度,经风机输送,通过送风管进入送风静压空间,由送风孔板进入干燥区域,当进入回风静压空间后,部分由排风口排出,部分由回风口回风后与新风混合,形成循环.

2 干燥基本能耗

以香菇为例,对食用菌干燥装置节能减排效果进行了理论计算,并与普通热泵干燥和传统燃煤干燥做了比较.

根据能量守恒原则,基本能耗计算分为围护结构传热能耗和香菇干燥能耗两部分.

围护结构基本尺寸为 $5\,400\text{ mm}(L) \times 3\,000\text{ mm}(W) \times 2\,900\text{ mm}(H)$.室外空气计算温度选用南京地区春秋平均温度,即 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$,围护结构传热能耗为各阶段传热负荷之和.围护结构热负荷计算结果汇总于表1.

香菇干燥热负荷分香菇升温负荷和香菇中水分蒸发负荷两部分,所求负荷为一个阶段的总负荷对时间的平均值,即认为升温 and 稳温过程中香菇中水分蒸发的速度相同.假设每次烘烤总量 $5\,000\text{ kg}$,而鲜香菇含水量约为 90%,干香菇含水量 10%,可知绝干物质质量 $M_1 = 5\,000 \times 1/10 = 500\text{ kg}$,干燥水量 $M_2 = 4\,000\text{ kg}$;水的比热容 $c_w = 4.187\text{ kJ}/(\text{kg}/^{\circ}\text{C})$,香菇的比热容 $c_m = 3.54\text{ kJ}/(\text{kg}/^{\circ}\text{C})$;0.1 MPa、 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,水的汽化潜热 $r_w = 2\,369.78\text{ kJ}/\text{kg}$.

以烘干期干燥热负荷计算为例:

蒸发水量: $W_1 = 4\,000 \times 20\% = 800\text{ kg}$.

加热水量: $W_2 = 4\,000 \times (20\% + 10\%) = 1\,200\text{ kg}$.

干燥时间: $T=2$ h.

烘干期香菇干燥热负荷为

$$Q_{m3} = \frac{W_2 \times c_w \times \Delta t + M_1 \times c_m \times \Delta t + W_1 \times r_w}{T} = \frac{1\,200 \times 4.187 \times (55 - 45) + 500 \times 3.54 \times (55 - 45) + 800 \times 2\,369.78}{2 \times 3\,600} \times 1\,000 = 272\,745.6 \text{ W}.$$

香菇干燥热负荷计算结果汇总于表 1.

耗能量包括一个阶段中围护结构耗能量和香菇干燥耗能量.

以烘干期耗能量计算为例:

$$Q_{i3} = (Q_{i3} + Q_{m3}) \times T = (272\,745.6 + 3\,303.84) \times 2 \times 3\,600 = 19.9 \times 10^5 \text{ kJ}.$$

各阶段耗能量计算结果汇总于表 1.

表 1 香菇干燥基本能耗汇总表

Table 1 Summary of basic consumption for drying mushroom

阶段	初步烘干期	恒速烘干期	烘干期	完全烘干期
温度/℃	37.5	45	55	62.5
升温/持续时间/h	3	4	2	1
脱水量/%	30	40	20	10
围护结构热负荷 Q_i /W	1 497.1	2 271.4	3 303.8	4 078.2
香菇干燥热负荷 Q_m /W	292 975.5	273 014.6	272 745.6	268 593.3
耗能量 Q_i ($\times 10^5$ kJ)	31.8	39.6	19.9	9.8
总耗能量 Q_i ($\times 10^5$ kJ)		101.1		

3 效益计算及分析

3.1 本装置能耗

本装置干燥所需热量由三级加热装置梯级供给:其中太阳能预热系统将空气加热至 35 ℃;热泵系统根据各阶段实际供热需求变工况加热,综合性能系数 COP 取 3.2;电加热装置只在极限工况下进行温度调控,耗能很小,本例算忽略.

以南京为例,在分析全年气象数据的基础上,得到太阳能预热系统的可用率 n 为 42.13%,则一个干燥周期中预热系统可提供的热量 Q_s 为各阶段太阳能提供热量之和.各阶段太阳能可提供热量为各阶段耗能乘以太阳能提供能量的百分比与可用率之积,以恒速烘干期计算为例,太阳能提供热量为

$$Q_{s2} = Q_i \times \eta_i \times n = 39.6 \times (35 - 23) / (45 - 23) \times 10^5 \times 42.13\% = 9.1 \times 10^5 \text{ kJ}.$$

则:

$$Q_s = \sum_{i=1}^4 Q_{si} = (31.8 \times 0.83 + 39.6 \times 0.545 + 19.9 \times 0.375 + 9.8 \times 0.3) \times 10^5 = 24.59 \times 10^5 \text{ kJ}.$$

由于采用平行送风方式,计烘烤时间缩短 2.5%,送风温度降低 3 ℃(相当于节能 15%),则装置实际耗电量按照 0.33 kg(标煤)/(kW/h)折算,相当于标准煤耗 $M_1 = 550.4 \times 0.33 = 181.6$ kg.

3.2 普通热泵干燥能耗计算

普通热泵干燥中热泵性能系数 COP 依然取 3.2,则一个干燥周期耗电量按照 0.33 kg(标煤)/(kW/h)折算,相当于标准煤耗 $M_2 = 877.6 \times 0.33 = 289.6$ kg.

3.3 传统燃煤干燥能耗计算

传统烘烤房燃烧效率取 80%,则一个烘烤周期内标准煤耗量:

$$M_3 = Q_j / (Q_{ar,net} \times 80\%) = 101.1 \times 10^5 / (29\,306 \times 80\%) = 431.2 \text{ kg}.$$

3.4 节能减排效益对比

本装置与普通热泵干燥和传统燃煤干燥相比分别节能 37.29% 和 57.88%,计算结果汇总于表 2,以 1 kg 标准煤产生 2.62 kg CO_2 , 0.007 4 kg NO_x , 0.008 5 kg SO_x 折算,与普通热泵干燥相比, CO_2 、 NO_x 、 SO_x 分别减少排放 282.96 kg、0.80 kg、0.92 kg;与传统烘烤房相比, CO_2 、 NO_x 、 SO_x 分别减少排放 653.95 kg、1.84 kg、2.12 kg,本装置节能减排效果显著.

表 2 3 种干燥方式能耗对比

Table 2 Comparison of energy consumption between three types of drying methods

类型	烘烤总量/kg	基本能耗/ $\times 10^5$ kJ	实际能耗/ $\times 10^5$ kJ	耗能(折合成标煤/kg)
传统烘烤房	5 000	101.1	126.4	431.2
普通热泵干燥			84.9	289.6
平行送风干燥			53.2	181.6

4 结语

和传统干燥设备相比,本装置一方面可以实现较高的干燥品质,经济效益提高;另一方面可以通过改造现有烘烤房,降低初投资和设备运行费用,实现高效管理,3 年可以回收改造和建设成本. 装置运行费用比常规热泵干燥和传统燃煤干燥分别减少 31.64% 和 17.33%.

本装置节能减排效果突出,一方面采用平行送风方式降低送风温度,缩短干燥时间,降低能耗;另一方面,采用梯级加热系统,充分利用可再生能源,能耗降低, CO_2 、 NO_x 和 SO_x 污染排放减少.

[参考文献](References)

- [1] Li Jin Goh, Mohd Yusof Othman, Sohif Mat, et al. Review of heat pump systems for drying application[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011(15): 4 788–4 796.
- [2] Mortaza Aghbashlo, Hossein Mobli, Shahin Rafiee, et al. A review on exergy analysis of drying processes and systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013(22): 1–22.
- [3] 马洪江,王海,王颀. 混联式太阳能果蔬烘干机的研制[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 50–54.
Ma Hongjiang, Wang Hai, Wang Jie. Design of hybrid type mixed-mode solar dryer for fruits and vegetables[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(3): 50–54. (in Chinese)
- [4] Alejandro Reyes, Andrea Mahn, Francisco Cubillos, et al. Mushroom dehydration in a hybrid-solar dryer[J]. Energy Conversion and Management, 2013(70): 31–39.
- [5] Ali Motevali, Saeid Minaei, Mohammad Hadi Khoshnaghza, et al. Comparison of energy consumption and specific energy requirements of different methods for drying mushroom slices[J]. Energy, 2011(36): 6 433–6 441.

[责任编辑:严海琳]