

热泵除湿干燥系统循环风旁通率的试验

胡传坤¹, 高建民¹, 付翔², 刘鑫玉¹

(1. 北京林业大学材料科学与技术学院, 北京 100083; 2. 南京林业大学木材工业学院, 江苏南京 210037)

摘要: 结合试验, 分析循环风的状态与热泵除湿干燥系统能耗的关系。结果表明: 循环风的旁通率对热泵除湿干燥系统的除湿比能耗具有一定的影响; 不同干燥介质状态下, 存在一个最佳的旁通率, 此时热泵除湿干燥系统的除湿比能耗最低。

关键词: 干燥系统; 热泵; 循环风; 旁通率

中图分类号: TS651 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654(2008)05-0008-03

An Experimental Study of Wind Circulation Bypass-Rate in a Heat-Pump Drying System

HU Chuan-kun¹, GAO Jian-min¹, FU xiang², LIU Xin-yu¹

(1. College of Material Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. College of Wood Science and Technology, Nanjing Forest University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: About 40% to 70% of total energy used for manufacturing wood products is consumed for drying wood. It is critical to increase the drying efficiency and improve drying energy consumption. A heat-pump drying system is a typical wood drying facility used in China. The objective of this study was to improve the drying system by optimizing the wind circulation. The relation between cycling-wind and energy consumption was examined in this paper. The results showed that the bypass-rate of cycling-wind had a significant effect on the specific power consumption (SPC) of a heat-pump drying system.

Key words: drying system; heat-pump; wind circulation; bypass-rate

木材干燥是木制品生产中的能耗大户, 约占总能耗的 40%~70%。传统木材干燥采用开放式循环热风干燥, 热气热量损失大; 相对而言, 闭式循环热泵除湿干燥的能耗较低, 与常规干燥相比, 节能率可达 40%~70%^[1-2]。但目前热泵除湿干燥装置的前期投资较大, 为此, 必须对现有的热泵技术进行改进^[3-4]。笔者在原除湿干燥系统的基础上, 采用增加旁通风管的改进办法, 探讨不同工况条件下, 循环风旁通率对脱水能耗的影响, 为进一步提高热泵除湿干燥设备的效率提供依据。

收稿日期: 2007-10-25; 修改稿: 2008-08-29

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD18B0802)。

作者简介: 胡传坤(1984—), 男, 北京林业大学材料科学与技术学院硕士研究生。

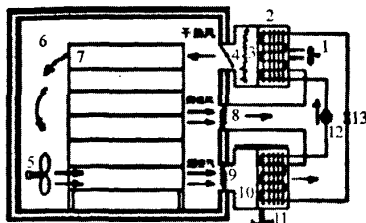
1 热泵除湿干燥系统的改造

1.1 原理

改进的热泵除湿干燥系统如图 1 所示。通过调节旁通风阀(阀门 8), 使得流经蒸发器的空气流量降低、焓差增大, 除湿效率提高^[5-6]。旁通的空气流量以旁通率(bypass rate, BR)来衡量, 即未流经蒸发器的空气流量与流经蒸发器的空气流量的比值。旁通率增大, 通过蒸发器的空气量减少, 需冷却的空气量随之减少, 热泵干燥系统的制冷量一定, 则循环风通过蒸发器进行热交换后, 脱湿后的空气温度降得更低, 从而提高系统的除湿干燥能力。

1.2 热泵除湿系统性能评价指标

热泵除湿干燥系统的性能, 可以用供热系数(coefficient of performance, COP)和除湿比能耗



1. 热风循环风机; 2. 冷凝器; 3. 加热器; 4. 风阀; 5. 风机; 6. 除湿干燥室; 7. 材堆; 8. 9. 阀门; 10. 蒸发器; 11. 水槽; 12. 压缩机; 13. 节流阀

图 1 木材热泵干燥实验装置原理图
Fig. 1 Schematic of typical heat-pump dryer

(specific power consumption, SPC)来评价。一般情况下,在干燥材的树种、厚度、初含水率基本相同的条件下,SPC 越小,则干燥能耗越低^[7]。本试验主要采用 SPC 对热泵除湿系统进行评价。

SPC=W/m (1)

式中:W—同一工况下单位时间能耗,kW·h;m—同一工况下单位时间内木材的脱水量,kg。

2 试验方法及数据处理

2.1 试验设备

干燥装置如图 1 所示。其他还有:数据采集系统,XSL 系列智能巡检仪,Agilent 34970A;电子天平;电子式电能表,等。

2.2 试验方法

1) 制定干燥基准 试验木材为 40 mm 厚水曲柳(*Fraxinus mandshurica*),采用含水率干燥基准。

2) 进行木材干燥 首先调节干燥室内的温、湿度至干燥基准要求值,调节回风管和旁通风管的风阀,使空气流量处于某一状态。通过热球式风速仪,测两管的风速,确定此时的旁通率。然后开启热泵除湿系统进行除湿干燥,并记录数据。维持同一干燥介质和旁通率状态,进行 0.5~1 h 的试验;再调节回风管和旁通风管的风阀,改变旁通率,循环试验。旁通率从小到大,逐渐递增。

3) 采集试验数据 干燥室空气循环系统内各点的空气温度、湿度,以及热泵循环系统内各处制冷工质的压力、温度,由数据采集系统自动实时采集。每 15 min 对盛蒸发器冷凝水的容器进行称量,即得该时段的除湿量;同时记录热泵除湿系统各部分的电耗,即得该时段热泵除湿机的能耗。

2.3 试验数据分析

不同介质和旁通率状态下,热泵干燥系统的除湿

量结果见表 1。除湿时,热泵干燥系统的能耗 W 基本不变,平均每 15 min 为 0.12 kW·h。

表 1 热泵干燥系统每 15 min 的除湿量
Tab. 1 Amount of dehumidification of the heat-pump system every fifteen minutes

BR	状态 1	状态 2	状态 3	状态 4	状态 5	状态 6
	T=65	T=67	T=70	T=75	T=80	T=90
	Φ=86	Φ=82	Φ=72	Φ=63	Φ=50	Φ=43
0	111.01	106.95	82.82	66.19	41.90	39.95
0.54	110.29	100.84	98.28	72.29	67.45	49.63
0.94	109.99	98.85	90.70	70.88	70.42	54.03
1.54	109.09	96.85	84.87	69.08	58.08	51.61
2.14	79.10	77.02	67.72	58.88	54.01	50.53
4.94	37.33	34.74	30.15	26.79	22.28	21.68

注: T 表示温度,℃;Φ 表示相对湿度,%。

2.3.1 SPC 与干燥介质的关系 图 2 显示旁通率为 0 时,SPC 与干燥介质状态的关系。随着干燥介质温度升高、相对湿度降低,脱湿后空气温度升高,脱湿量下降。因此,制冷量相同时,制冷量主要用于降低循环风温度并使其饱和,剩下较少的制冷量用于循环风饱和后进一步脱湿,故除湿量下降^[7]。

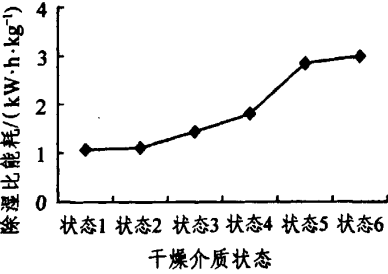


图 2 SPC 与干燥介质状态的关系(BR=0)
Fig. 2 Relation between specific power consumption and desiccant(BR=0)

2.3.2 脱湿空气温度与旁通率的关系 从图 2 可知,干燥后期,热泵除湿干燥系统的 SPC 很高,几乎不脱湿,降低脱湿后空气的温度,可以提高脱湿量。而图 3 表明,当增大旁通率时,同一状态下,脱湿后空气的温度降低。通常,热泵干燥系统的制冷量一定,增大旁通率,需脱湿的空气量减少,除湿机有更多的制冷量用于降低饱和空气温度,故除湿后空气的温度降低^[5]。

2.3.3 SPC 与旁通率的关系 由图 4 可见,在同一旁通率状态下,SPC 随着干燥介质的温度升高、相对湿度降低而增大。例如:旁通率为 0.54 时,干燥介质 1、3、5 状态下的 SPC 分别为 1.088、1.221、1.779

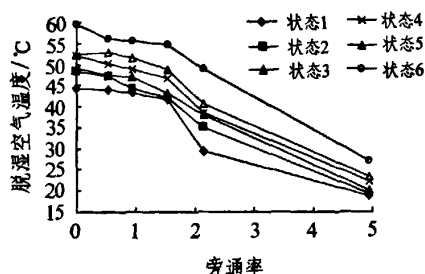


图3 脱湿空气温度与旁通率的关系

Fig. 3 Relation between air temperature and bypass-rate

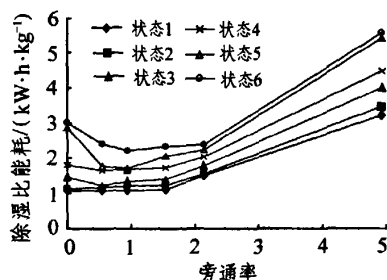


图4 除湿比能耗与旁通率的关系

Fig. 4 Relation between specific power consumption and bypass-rate

$\text{kW} \cdot \text{h}/\text{kg}$, SPC 的变化规律与不开旁通时相同, 即始终打开旁通风阀无法使系统能耗降低。在状态 3 下, 旁通率为 0.54 时的 SPC, 比同状态下不开旁通时的 SPC 降低了 15.7%; 在状态 5 下, 旁通率为 0.94 时的 SPC ($1.704 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{kg}$), 比同状态旁通率 0.54 时的 SPC 降低了 4.2%, 比同状态不开旁通时降低了 40.5%。由此可见, 在热泵除湿干燥中, 一定干燥介质状态有一个对应的旁通率, 此时的 SPC 最低。所以, 在热泵干燥过程中, 应根据干燥介质状态来调节旁通率, 使干燥能耗最低, 增强节能效果^[6, 8]。

由图 4 还可见, 在木材干燥的不同阶段, 同一干燥介质状态的 SPC 随旁通率的变化规律。在干燥前期, SPC 随旁通率的增大而增大; 在干燥中后期, 随着旁通率的增大, SPC 呈现先减后增的趋势。其原因^[5, 8]主要是:

1) 热泵除湿干燥系统的 SPC 主要取决于除湿量。随着旁通率的增大, 脱湿空气温度下降, 其除湿量没有线性增加(表 1 所示)。

2) 从湿空气的焓湿图可知, 低温空气温度每改变 1°C 的湿含量变化, 小于高温空气温度的湿含量变化。干燥初期, 温度低、相对湿度高, 热泵除湿干燥系

统的制冷量基本用于水蒸气凝结所需潜热, 蒸发器冷量利用效率高, 能够充分发挥热泵的除湿效果; 增大旁通率, 通过蒸发器的空气量减少, 可以使脱湿后空气温度降得更低, 但降温增加的脱水量比减小空气流量所减少的脱水量小, 综合效果是除湿量反而减少。如状态 1、状态 2, 旁通率为 0.54 时, SPC 分别为 1.088 、 $1.190 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{kg}$, 都比旁通率为 0 时的 1.081 、 $1.122 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{kg}$ 大。

3) 干燥中后期, 温度较高、相对湿度低, 热泵除湿干燥系统的制冷量大部分用于降低循环空气的温度。热泵干燥系统的制冷量未充分用于脱湿, 而增大旁通率, 通过蒸发器的空气量减少, 同状态循环空气降温至饱和状态所需的制冷量减少, 更多的制冷量将用于脱湿。与前期相比, 虽然减少了空气量, 但降温脱湿的脱水增加量比减少空气流量所减少的脱水量大, 综合效应是除湿量增大。如状态 3、状态 5, 随着旁通率的增加, SPC 先降低再增加。

3 结论

1) 在热泵除湿干燥中后期, 增大旁通率有助于降低 SPC;

2) 每个干燥介质状态存在一个最佳旁通率, 使得热泵干燥系统的 SPC 最低;

3) 本试验是在小型试验设备上进行的, 还需在此基础上, 结合 COP 做进一步的试验, 为实际生产提供准确的旁通率参数。

参考文献:

- [1] 张壁光. 木材科学与技术研究进展[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.
- [2] 张壁光, 赵忠信, 霍光青. 除湿干燥的节能分析[J]. 林产工业, 1995, 22(6): 35-38.
- [3] Rowland, Charles A (Kling), Wendel J, et al. Dehumidification technologies [J]. HPAC Heating, Piping, AirConditioning Engineering, 2005, 77(3): 48-53.
- [4] 张壁光, 李贤军. 榉木除湿干燥的能耗分析[J]. 林产工业, 2004, 31(1): 27-29.
- [5] 张壁光. 除湿干燥中临界除湿状态的分析[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(6): 128-131.
- [6] 周永东, 张壁光. 湿空气旁通率对热泵除湿干燥机能耗影响的分析研究[J]. 林业科技通讯, 1999(9): 2-3.
- [7] 陈军, 史琳, 张金龙, 等. 高温除湿干燥机的实验和分析[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(S1): 22-26.
- [8] Kosar, Douglas. Dehumidification system enhancements [J]. ASHRAE Journal, 2006, 48(2): 48-52, 56-58.

(责任编辑 向琴)