

热泵在木材干燥上的应用

APPLICATION OF HEAT PUMP IN TIMBER DRYING

孔祥熔 陈显余

(上海市能源研究所, 上海)

本文介绍了一种能调节旁通风量的密闭回路热泵干燥系统, 并且该系统成功地应用于木材干燥。同时, 本文还给出了一些测试数据, 运行和干燥曲线以及热泵性能计算结果。结果表明干燥热泵是一种新颖的节能干燥装置并且可广泛地应用在干燥工艺中。

This paper introduces a closed heat pump drying system of the regulatable bypass air input. And the system applies to timber drying successfully. This paper also gives some data, operating and drying diagrams and calculating results of heat pump performance. The results show that the drying heat pump is a new drying unit of saving energy and it can extensively be applied to drying process.

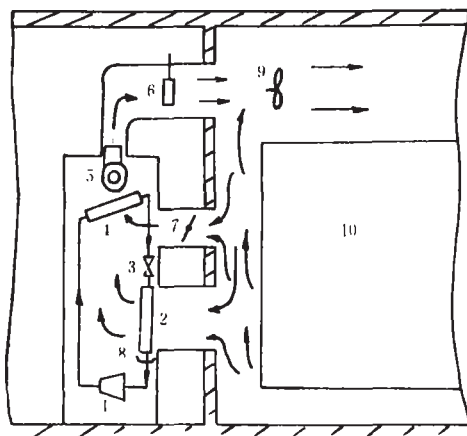
热泵是一种利用少量高品质能量(如电能、机械能等)或高温位热能提高低温位热能品位并加以利用的节能装置。欧美、苏联和日本等先进工业国在热泵研究和应用方面作了大量的工作。八十年代以来, 进一步提高了热泵温度水平并应用于工业余热回收和干燥工艺过程。近几年, 西欧等国相继研制和开发 80~120℃ 的高温热泵, 并开始在许多工业领域中应用。

为了探索热泵在工业上的应用, 根据我国的工业生产需要以及工业基础和国外热泵应用经验(低温热泵干燥木材虽然节能, 但干燥周期长), 为此我们着手研制电驱动压缩式高温干燥热泵并应用于木材干燥。这是因为从木材干燥动力学来说, 提高空气介质的温度就是提高木材水份蒸发的动力学过程, 木材内水份向表面扩散的速度随温度的升高而增大, 从而加快了木材干燥速度⁽¹⁾。该系统自 1986 年 8 月起在浙江海宁家具总厂进行木材干燥, 运行结果表明该系统运行性能良好。

一、密闭回路热泵干燥系统

通过对近年来国外报道的热泵干燥系统的分析与比较⁽²⁾, 我们采用了能调节旁通量的密闭回路热泵干燥系统(见图 1)。

在常规的木材干燥系统中（蒸汽、红外等），干燥室内的湿热空气被排放到大气中，以致常规的木材干燥能耗大。而在密闭回路热泵干燥系统中，充分利用热泵能同时制冷和供热的特点。被干燥物料在干燥室内脱湿，排出的湿热空气一部分通过热泵蒸发器被冷却到露点温度，空气中的部分水蒸汽冷凝成水排出热泵，同时放出潜热，而另一部分湿热空气被旁通到热泵冷凝器前与通过蒸发器除湿后的空气相混合，并通过冷凝器加热再次进入干燥室，对被干燥物料提供脱水所需的热量。空气则在干燥室内降温增湿，继而被排出给热泵。这样周而复始，使物料得到干燥。



1.压缩机 2.蒸发器 3.膨胀阀 4.冷凝器 5.热泵风机
6.辅助加热器 7.旁通调节阀 8.集水盘 9.循环风机 10.材堆

图 1 密闭回路热泵干燥系统

同时，由于在本热泵干燥系统中设置了旁通调节阀，通过调节旁通风量使通过蒸发器的湿热空气能较好地与蒸发器制冷量相匹配，充分发挥蒸发器的除湿能力，保持有较高的脱水量，亦即使干燥热泵以较佳的性能运行。

二、热泵干燥系统运行性能实测结果

该系统在木材干燥运行中,我们先后作了五次较为详细的测试。

下面分别简要介绍实测热泵性能和系统性能的实测综合结果。

1. 热泵性能测试结果

在五次测试中，其结果基本相近。在测试中，热泵运行工况随着木材干燥过程而变化。但是，当木材内水份向空气介质扩散和空气介质被热泵除湿相平衡时，热泵运行工况的变化很微小，系统各参数往往在数小时内近似不变。因此可将这段时间内的运行工况看作为稳定工况。在该段时间内，间隔地测量各参数数据，然后取平均值作为热泵运行工况的各参数值。现仅列出最后一次测试结果，见表 1。

表 1. 热泵性能测试数据

参 数		单 位	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
热泵干燥系统电耗	W	kWh / h	5.33	4.33	4.67	4.33	3.67
热泵压缩机电耗	W_p	kWh / h	3.33	2.83	2.67	2.67	2.33
脱水量	M_w	kg / h	13.47	11.52	9.88	7.62	3.82
蒸发压力	P_e	kg / cm ²	4.5	4.2	4.1	4.1	3.7
蒸发温度	t_e	℃	33.3	30.9	30.2	30.2	26.7
冷凝压力	P_c	kg / cm ²	14.0	11.2	10.5	10.4	9.2
冷凝温度	t_c	℃	78.8	68.8	66.0	65.6	60.4
蒸发器进口气流温度	t_2	℃	52.2	47.5	44.9	45.7	42.4
蒸发器进口气流湿度	φ_2	%	86.5	86	72	65	48.5
蒸发器出口气流温度	t_3	℃	47.0	39.7	38.7	38.0	33.7
蒸发器进口气流温度	t_4	℃	48.0	43.2	43.0	44.7	44.0
蒸发器出口气流温度	t_5	℃	71.7	63.2	61.2	60.2	55.7
蒸发器出口气流湿度	φ_5	%	81.8	72.8	69	57	41

众所周知, 对热泵性能评价的主要参数是:

$$COP_a = Q_c / W_p \quad (1)$$

式 (1) 表示热泵在能耗上的得益, 即热泵实际性能系数。以及

$$(HPE)_R = COP_a / COP_R \quad (2)$$

式 (2) 表示热泵运转总效率, 即热泵的实际循环和理论循环之间的差异。

上面两式中的 W_p (压缩机功耗) 为实测所得, Q_c (热泵制热量) 则需通过所测得的数据计算得到。而 COP_R 可通过理论计算得出。

热泵制热量 Q_c 为通过热泵冷凝器前后的空气介质的焓差, 即

$$Q_c = H_5 - H_4 = [(C_{pa} + C_{pw} \cdot d_5) \cdot t_5 - (C_{pa} + C_{pw} \cdot d_4) \cdot t_4] M_a \quad (3)$$

由于通过冷凝器的空气介质是等湿加热, 即 $d_5 = d_4$, 所以, 式 (3) 可简化为:

$$Q_c = (C_{pa} + C_{pw} \cdot d_5) \cdot (t_5 - t_4) \cdot M_a \quad (4)$$

式 (4) 中, 通过热泵冷凝器的空气介质的绝对含湿量 d_5 和质量流量 M_a 均可通过计算得到。

而评价热泵干燥装置性能常用单位能耗脱水率来表示。即 $SPE = M_w / W$ (5)

式 (5) 中, M_w 为单位时间的脱水量, W 为热泵干燥装置单位时间的能耗。

这些数据的计算结果列于表 2。

表 2. 热泵性能计算结果

项 目	单 位	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
热泵制热量 Q_c	kcal / h	13336	11400	10403	8846	6734
朗肯性能系数 COP_R	/	6.50	10.70	11.47	10.56	12.42
实际性能系数 COP_a	/	4.66	4.68	4.53	3.85	3.36
热泵系数 $(HPE)_R$	/	0.72	0.44	0.39	0.36	0.27
单位能耗脱水率	kg / kWh	2.53	2.66	2.12	1.76	1.04
单位热泵能耗脱水率	kg / kWh	4.05	4.07	3.70	2.85	1.64

2. 热泵干燥系统运行测试结果

图 2 给出了第五次运行测试中热泵干燥系统运行特性随时间变化的情况。

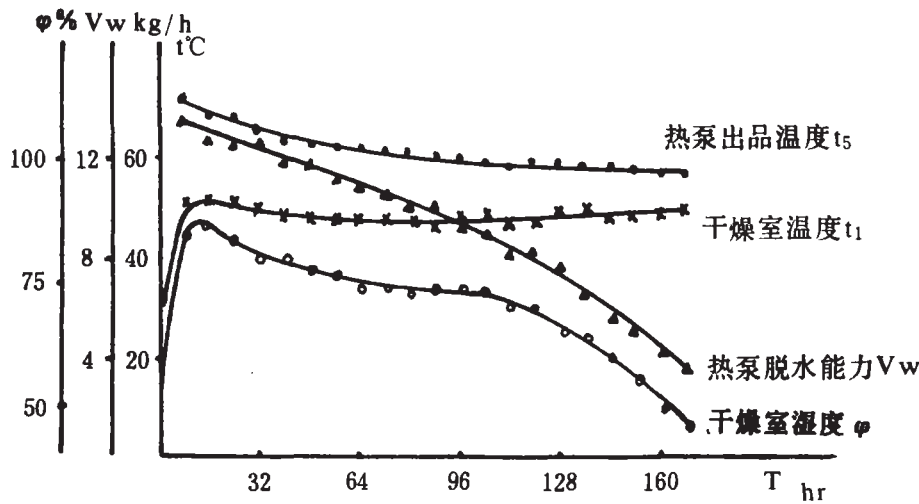


图 2. 热泵干燥系统运行参数变化曲线

表 3 给出了热泵干燥系统在五次木材干燥过程中所测得的综合结果。

表 3. 热泵干燥系统测试综合结果*

测 试 编 号	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]
运 行 日 期	86.8.26~9.1	87.2.15~2.23	87.3.6~3.11	87.6.3~6.7	87.9.11~9.18
材种	洋 松	南方松	南方松	南方松	洋 松
材厚 mm	17	20; 23; 38	20	17	17
材体积 m ³	14.5	23.26	19	16.8	16
初含水率 %	44	40	40	40	54
终含水率 %	11.8	11.7	10	14	12
干燥周期 hrs	125	190.5	107	90	168
总耗电量 kWh	1040	2167	1164	996	1745
单位木材能耗 kWh/m ³	71.72	93.16	61.26	59.29	109.06
总脱水量 kg	2038.5	2595.7	1845.7	1608.3	2934.4
单 位 能 耗 脱 水 率	1.96	1.20	1.59	1.61	1.68
平均脱水能力 kg/h	16.3	13.6	17.2	17.9	17.5

*在浙江海宁家具总厂由两台性能相同的热泵同时运行进行木材干燥

3.木材干燥均匀性测试

为了检验本热泵干燥系统木材干燥的均匀性，在干燥室内材堆的不同高度和位置上放了一些试样，在干燥过程中和干燥结束后测量木材的含水率。结果分别见表 4 及图 3。

表 4. 木材终含水率

测试编号	试样数量	平均含水率	标准偏差 σ_{n-1}
2 [#]	25 块	11.7%	2.1%
5 [#]	27 块	10.97%	2.7%

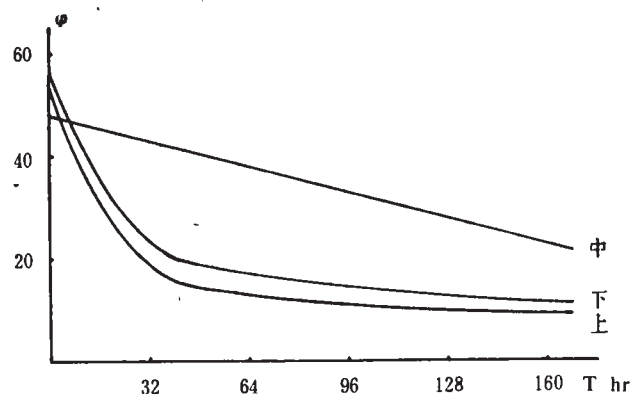


图 3.不同高度样板含水率——干燥时间曲线

三、测试结果分析

干燥热泵作为一种新颖节能干燥装置，我们主要对其能耗指标进行分析。我们查阅了国内外有关干燥热泵的资料^(3,4)，特别是英国电力委员会研究中心与韦斯泰尔动力公司联合研制的一台功率为 9kW 的高温热泵干燥与我们的热泵干燥装置相接近。这台干燥热泵的性能数据也是我们迄今见到的比较完整和比较先进的数据。现选择几种和我们测试中干燥条件相近的数据摘自表 5。

根据表 3，我们研制的干燥热泵的单位木材能耗为 59.3~109.1kWh / m³，平均值为 79.41kWh / m³。由于单位木材能耗涉及到的因素很多（如木材初、终含水率，材种、材厚等），所以可认为这两组数据是相近的。

表 5. 英国高温热泵木材干燥数据

材 种	材 厚 mm	材 积 m ³	含水率 %		干燥时间 hr	单位木材能耗 kwh / m ³
			初	终		
松 木	25	12.7	78.4	10.4	144	127
云 杉	25	12.7	55.3	9.4	96	87
山毛榉	25	10.9	48.6	9.5	209	180
山毛榉	25	10.7	52.3	10.7	168	152
红 松	32~38	13.2	65.1	9.2	237	167

至于单位能耗脱水率，从 5 次测试来看，其为 1.20~1.96kg / kWh，平均值为 1.55kg / kWh。而据英国总结报道⁽⁴⁾，其高温热泵压缩机最大比脱水率为 3kg / kWh。若计及循环风机和电加热器的能耗，则其比脱水率为 1.53kg / kWh。而我们的高温干燥热泵压缩机的比脱水率大于 3kg / kWh 的工况约占干燥全过程的 3 / 4，最大值可达 4kg / kWh。若考虑干燥系统的能耗，则平均比脱水率 1.55kg / kWh 可以和英国热泵装置的性能水平相比拟。

在测试中,温度、脱水量和用电量相对来说比较方便和精确地测量,因此干燥每立方木材的能耗和单位能耗脱水率的计算结果是可靠的。但是湿度测量则受国产氯化锂湿度仪的精度和可重复性的影响,测得的相对湿度有些误差,因而实际热泵性能系数 COP_a 的计算结果也同样有一定的误差。通过误差分析和计算,由相对湿度的测量误差引起实际热泵性能系数 COP_a 的误差约为 5% 左右。

四、结束语

我们利用国内成熟的制冷技术研制的高温干燥热泵并采用能调节旁通量的密闭回路热泵干燥系统在木材加工行业成功地得到应用并取得了预期的效果。但是,由于对木材干燥缺乏经验,本系统的气流组织不尽完善以及干燥室没能严格按密封保温设计要求,影响了热泵的性能。

在我国,干燥工艺的能耗占有一定的比例,而且干燥设备的效率又很低。同时我国的能源综合利用率又较低,大量的低温余热资源没有得到有效的利用。这就为热泵的应用提供了广阔的前景。目前,我们所研制的高温干燥热泵正在木材加工行业中推广应用,并准备推广应用于食品、化工、纺织等行业。同时,我们正在开展进一步提高热泵供热温度水平的工作,扩大热泵的应用范围。

参考文献

- (1.) 梁世镇,“木材干燥”,南京林学院,1983,12
- (2.) “The Potential for Heat Pump in Drying and Dehumidification System”, Int. j., Energy Research pp305—341, October 1982
- (3.) T. N. Oliver, “Process Drying with a Dehumidifying Heat Pump”, International Symposium on the Industrial Application of Heat Pump, 24—26 March 1982
- (4.) J. L. Driscoll, M. P. Bertiant, “The Capenhurst Westair High Temperature Heat Pump Dryer”, Jun. 1981, Bibliographic Information PB82—116690
- (5.) “高温工业干燥热泵鉴定文件”,上海市能源研究所1987,11