

高温热泵除湿干燥技术的初步研究

王喜平 张壁光 赵忠信

(北京林业大学 北京 100083)

摘要 本文介绍了高温热泵除湿干燥的工作循环及评价指标,并在研制RCC30G高温热泵除湿干燥机的基础上进行实际干燥实验研究。结果表明:1.高温热泵除湿干燥节能效果显著,干燥速度较快,具有较高的干燥质量;2.采用R142b制冷剂可以获得较高的供风温度(最高供风温度 $>70^{\circ}\text{C}$),缩短干燥周期,降低能耗,同时可以减少对大气臭氧层的破坏;3.从干燥室低温区引入二次风可以减少干燥室的热量损失,同时可以满足冷凝器的风量要求。

关键词 热泵;除湿;干燥;制冷循环;供热系数;脱水比能耗

1 前言

木材干燥的能耗约占木材加工企业总能耗的70%,而能量的利用率却很低,仅为30%左右(以一次能源计算)。如何提高木材干燥中能量的利用率、降低能耗,是木材加工企业面临的一个重大课题。热泵除湿干燥技术是80年代初发展起来的一种新型节能干燥技术,它具有除湿干燥和热泵供热的双重功能,故又称为“双热源式除湿干燥”。

热泵除湿干燥按最高供风温度分低温(50°C 以下)、中温($50\sim 60^{\circ}\text{C}$)和高温(大于 70°C)三种类型,供风温度范围主要取决于压缩机和制冷剂的性能。目前我国的除湿干燥机产品(包括单热源和双热源)多属中温型,最高供风温度低于 60°C 。因而木材干燥时间较长,特别是干燥厚材、且终含水率要求低于15%时,这种缺点就更加突出,从而限制了这种节能型干燥技术的使用范围。为此,北京林业大学和北京冷冻机厂合作,在已经研制成功RCC15型中温热泵除湿干燥机的基础上,共同开发研制了具有高效、节能的RCC30G高温热泵除湿干燥机(1993年通过鉴定,即将投入小批量生产)。

2 高温热泵除湿干燥的工作循环

RCC30G型高温热泵除湿干燥机由除湿和热泵两个工作系统组成,主要部件有压缩机、冷凝器、除湿蒸发器、热泵蒸发器、膨胀阀,主风机和热泵风机等(见图1)。热泵和除湿两个系统共用一台压缩机和一台冷凝器。为了获得较高的供风温度(最高供风温度大于 70°C),系统采用了高温制冷工质R142b。在制冷循环回路中,采用了回热式换热循环,以提高单位容积的制冷量和热泵的供热系数。在干燥介质(空气)的循环回路中,为了减少干燥室的热量损失,采取由干燥室低温区引二次风为主、补充新风为辅

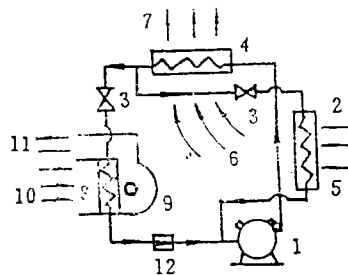


图1 热泵除湿干燥机原理图

1.压缩机;2.除湿蒸发器;3.膨胀阀;4.冷凝器;5.湿空气;6.脱湿后的干空气;7.送干燥室的热风;8.热泵蒸发器;9.热泵风机;10.外界环境空气;11.排出的冷空气;12.单向阀

收稿日期 1994-01-18

参加本项研究的还有霍光青先生。

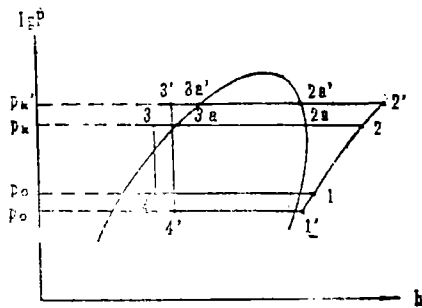


图2 制冷循环lgP-h图

的方法，来满足冷凝器正常工作所必须的风量。

2.1 制冷循环

制冷循环的压焓变化见图2，图中1-2-2a-3a-3-4-1为除湿工作循环，1'-2'-2a'-3a'-3'-4'-1'为热泵工作循环。1-2(1'-2')为制冷剂在压缩机内的绝热压缩过程，2-2a-3a(2'-2a'-3a')为制冷剂在冷凝器中的等压放热过程，3-4(3'-4')为制冷剂在膨胀阀中的绝热膨胀过程，4-1(4'-1')为制冷剂在蒸发器中的蒸发过程。

工作时，气体状态的制冷剂(1, 1'点)通过压缩机压缩升压后，其冷凝时的饱和温度也相应地升高到压力对应值(2a, 2a'点)。制冷剂在流经冷凝器时，通过冷凝器向外放热，制冷剂本身冷凝成液态(3, 3'点)。液态制冷剂经膨胀阀膨胀后降压，使制冷剂在蒸发时的饱和温度也降为相应的值(4, 4'点)。进入蒸发器的制冷剂从低温热源(干燥室回风或环境大气)吸热而蒸发变成低温低压的气态(1, 1'点)，之后气态制冷剂被压缩机吸入再次压缩，从而完成制冷工质的闭路循环，实现了热量从低温热源向高温热源(干燥室进风)的转移。

2.2 干燥介质的循环

除湿工况时，干燥介质(空气)循环的状态变化见图3。由干燥室来的湿空气(2点)，经过除湿蒸发器先降至露点(3点)，再降至状态4(图中所示为二次风量为零时的工况)，部分水分冷凝并排出机外，之后

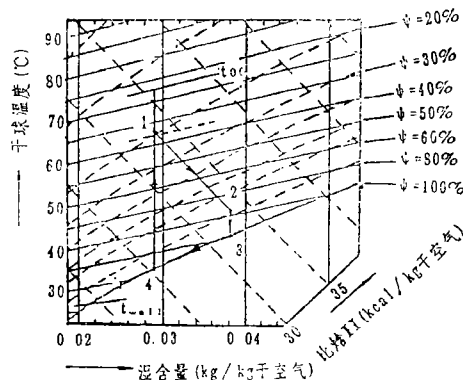


图3 空气循环状态图

低温低湿的空气(4点)经过冷凝器加热至状态1，成为高温低湿的空气，再送入干燥室干燥木材。高温低湿的空气与木材接触而吸湿，其相对湿度增加，湿空气沿着等焓线至干燥室出口(2点)，如此完成空气的闭路循环。

在除湿干燥过程中，空气的热量以及水蒸汽的潜热都得到了利用，避免了常规的蒸汽干燥在排湿时热量的散失和对环境的污染。在热泵系统工作时，除湿蒸发器停止工作，热泵蒸发器参加工作循环，此时系统直接吸取环境大气的热量，经系统制冷工质的循环将这部分热量“泵”入干燥室。由于充分利用了环境余热，节能效果更加显著。

3 热泵除湿干燥的评价指标

热泵除湿干燥系统的性能可以用供热系数COP和脱水比能耗SPC来评价。

3.1 供热系数COP

$$COP = Q/W$$

式中：Q—干燥机实际供热量(即冷凝器处的放热量)；

W—压缩机、机组风机及干燥室内风机等消耗的功。

根据国家能源部门公布的平均发电效率及锅炉效率可知，只要COP>1就节约电能(优于电加热)；当COP>2时，就优于锅炉供热(设发电效率为0.34，锅炉及管网效率为0.70)，COP越大说明干燥机性能越好。

3.2 脱水比能耗SPC

SPC = W / G (kW · h / kg水)

式中：W—某一工况下单位时间的能耗 (kW · h) ；

G—相同工况下单位时间内 木材的 脱水量 (kg) 。

一般说来，在干燥材的树种、厚度、初含水率基本相同的条件下，SPC越小，则干燥机的能耗就越低。此外，可以用最高供风温度及最大除湿量来反映热泵除湿干燥系统的干燥能力。

4 高温热泵除湿干燥的运行实验

实验装置由RCG30G高温热泵除湿干燥机、木材干燥室及测试仪器组成。试验用木材为椴木、柞木、云杉，板厚有60mm、20mm两种规格，初含水率为30%~45.4%，终含水率为6.2%~10.7%。工艺流程如下：装窑→热泵→除湿→热泵→除湿……→出窑

木材装入窑内后，首先启动热泵升温，必要时辅以电热。当窑内湿空气的温度达到干燥工艺要求值时，关闭热泵；当窑内空气的相对湿度高于干燥工艺要求值时，就启动除湿系统进行除湿；当窑内湿空气的温度高于基准而相对湿度低于干燥工艺要求时，可关机闷窑或喷湿，等温度降低至低于干燥基准时，再开启热泵向窑内供热。如此循环工作，直至木材的含水率达到所要求的值。

实验过程中定时测量并记录干燥机稳定运行工况下的各项指标，部分试验数据处理结果见表1。

5 结论

5.1 高温热泵除湿干燥具有较高的供热系数（4.49~5.08）和较低的脱水比能耗（0.335~0.634），其干燥速度优于中温热泵除湿干燥，接近于常规蒸汽干燥。

5.2 对干燥前后木材的检查对比及对木材试样的内应力测试，证明实验过程中采用的木材干燥工艺是合理的，干燥后的木材基本

表1 高温热泵除湿干燥实验结果

材 种	椴木	柞木	云杉
材厚(mm)	60	20	60
初含水率(%)	31	30	45.4
终含水率(%)	10.7	6.2	10.5
干燥时间(天)	11.5	6.5	16
平均供热系数	5.07	5.08	4.49
平均脱水比能耗(kW·h/kg水)	0.634	0.335	0.596
最高供风温度(℃)	73.8	71.3	77.1
最大除湿量(kg水/h)	22.0	30.1	31.5
总脱水量(kg)	2680	4324	5300
压缩机实际功耗(kW)	<9	<9	<9.5

注：最高供风温度是指在未使用电热的情況下所获得的最高供风温度；实验地点：北京林业大学木材干燥实验室；实验时间：1993年7~10月。

上没有发现开裂、翘曲等干燥缺陷。

5.3 采用R142b为热泵除湿干燥机的制冷工质，既可以获得较高的供风温度，缩短干燥周期，又可降低压缩机的压缩比，减少能耗，同时可以减少对大气臭氧层的破坏，具有较好的应用前景。

5.4 从干燥室低温区引入二次风作为冷凝器的补充风，既可以满足冷凝器的风量要求，又能大大降低干燥室的热量损失。

5.5 高温热泵除湿干燥将制冷与热泵技术应用于木材干燥，可以降低木材干燥的能耗，提高干燥质量和经济效益。

6 参考文献

1 朱政贤主编. 木材干燥. 中国林业出版社, 1992

2 张祉祐主编. 制冷原理与设备. 机械工业出版社, 1987

3 广州能源所. 热泵在我国应用与发展专家研讨会文集 1988

4 张璧光、赵忠信. 对热泵除湿干燥木材的试验研究和建议.《林产工业》, 1992 (2)

5 张璧光、王喜平等. 湿空气参数对除湿干燥机能耗的影响. 第四届全国木材干燥学术讨论会, 1993.10

6 Zylla R etc. The potential for heat pumps in drying and dehumidification system. Int.j. Enery Res., 1982 (6) : 305~340

7 Toal B T etc. Experimental studies of low temperature drying by dehumidification. Int.J.Enery Res, 1988 (12) : 299~344

(下转第34页)

大青杨的水分扩散系数是柞木的2~4倍。

由于在考察干燥各树种的最佳风速时,需要对干燥速度和电能消耗做综合评定。因此本文未做探讨,尚待今后进一步研究。

3 结论

3.1 循环风速对木材干燥速度的影响效果随木材含水率的不同而异,但在临界含水率

以下时,影响效果不大。

3.2 循环风速对干燥速度的影响依木材树种、厚度和干燥温度而异。难干燥材应采用较低风速为宜。

3.3 由于试验采用小尺寸试件,热质传递规律与实际生产中的大尺寸板材可能存在差异,今后尚需进一步探讨。

(上接第13页)

Preliminary study on high-temperature heat pump dehumidification for wood drying

Wang Xiping Zhang Biguang Zhao Zhongxin
(Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract In this paper, the working circulations and evaluation methods of high-temperature heat pump dehumidification were presented. On the basis of research and development of RCG30G high-temperature heat pump dehumidifier for wood drying (HTHPD), a series of practical drying tests were performed. The results are as following: 1. RCG30G HTHPD can save energy effectively while drying timber, and also has advantages of high drying speed, good drying quality and lower drying cost. 2. Using the refrigerent R142b can raise the supply air temperature (Max. > 70℃), shorten the drying cycle and reduce the energy consumption and the ozonospheric disturbance. 3. By drawing second return air from the low temperature area of kiln into HTHPD, the heat loss of kiln was reduced greatly, meanwhile the air volume need of the condenser can be met perfectly.

Keywords Heat pump; Dehumidification; Drying; Refrigerent circulation; Coefficient of power; Specific power consumption

《木材加工机械》一九九五年征订启事

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告

“木材加工机械”是由林业部北京林业机械研究所主办,国内外公开发行的全国木材加工机械行业技术指导性刊物。

主要报导国内外木材加工机械行业发展的新动向、方针、政策,最新研究动态、科技信息及学术活动;木材加工机械的设计制造、技术革新和使用维修经验,标准及检测技术,人造板生产工艺等等。为了加强信息传递,介绍新产品、新工艺、新设备、新技术,欢迎广大客户在本刊发布产品广告,并竭诚为客户进行优质、高效的服务。

本刊为季刊,每季中月中旬出版,16开40页。

每 期 定 价 2.00 元, 全 年 8.00 元。刊号 ISSN1001—036X/NC11—2680/S。

为保证发行准确、及时,本刊采取自办发行,免费邮寄,全年均可办理订阅,订阅者可通过邮局或银行汇款至:

北京市和平里七区25楼《木材加工机械》编辑部,邮编:100013

开户行:工商银行北京和平里分理处

帐号:891116—17

户名:林业部北京林业机械研究所,请注明杂志订阅费