

高温除湿干燥的节能分析

刘鑫钰, 高建民, 王天龙, 张壁光

(北京林业大学材料科学与技术学院, 北京 100083)

摘要: 对杨木进行高温除湿干燥,并与常规干燥进行干燥能耗和木材质量的对比。结果表明,高温除湿干燥各阶段节能效果有较大差异,前期节能效果最好,平均能量回收率为30.5%;在同样的干燥基准下,两者的干燥周期和干燥质量基本一致,高温除湿干燥比常规干燥节能34.1%。未来的发展方向是高温除湿干燥与常规干燥联合进行。

关键词: 高温干燥; 除湿干燥; 节能; 杨木

中图分类号: S782.31

文献标识码: A

文章编号: 1001-8654(2010)02-0021-03

Energy Consumption Analysis for High-Temperature and Dehumidification Drying

LIU Xin-yu, GAO Jian-min, WANG Tian-long, ZHANG Bi-guang

(College of Materials Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: *Populus deltoides* lumber were dried using high temperature dehumidification and conventional methods under the same schedule. Energy consumption and drying quality during the two drying methods were monitored and compared. Results showed that the energy consumption was different during various drying stages. It was found that the most effective way to save energy was in the initial period and it could save up to 30.5%. The high-temperature dehumidification drying consumed 34.1% less energy than the conventional drying without compromising the drying quality. It was expected that high-temperature dehumidification would increase its popularity along with the conventional drying in the future.

Key words: high temperature drying; dehumidification drying; energy saving; *Populus Deltoides*

除湿干燥在能源和制冷行业又称为热泵干燥,因为能够回收干燥室空气排湿放出的热量,相对常规干燥,节能率达40%~70%^[1],是一种极具推广前景的节能干燥技术。

但是,我国除湿干燥的推广应用尚不理想,其原因之一是传统的除湿干燥工艺的温度低,干燥周期长^[2]。研制环保型高温工质及与之相匹配的制冷压缩机,是除湿干燥推广要解决的主要问题之一。

笔者使用清华大学研制的HTR01高温环保型

制冷工质,进行高温除湿干燥试验^[3],并与常规干燥工艺进行能耗与干燥质量的对比,旨在为高温除湿干燥的合理应用提供依据。

1 试验材料与方法

1.1 材料

试材:杨木(*Populus deltoides*),产地北京,基本密度为0.364 g/cm³,材积2 m³,长度2.2 m,宽度400~500 mm,厚度40 mm,初含水率40%。

1.2 设备

1) GGS-2/1 除湿干燥机^[4]:压缩机额定功率1.1 kW,制冷量4.5 kW,除湿风机功率0.285 kW,风量2 000 m³/h。制冷工质使用HTR01。

2) 加热系统:RY-72电加热油炉,油泵额定功率

收稿日期:2009-09-23; 修改日期:2010-01-12

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD18B0802)。

作者简介:刘鑫钰(1985—),男,北京林业大学材料科学与技术学院硕士研究生。

通讯作者:高建民,男,北京林业大学材料科学与技术学院教授,博士生导师。

1.5 kW,循环泵额定功率 2.2 kW,电加热管功率 12 kW,共 6 个。

- 3) 干燥窑:金属壳体,风机功率 1.1 kW,共 2 台。
- 4) 喷雾系统:DQ90-36B 电加热蒸汽发生器。

1.3 方法^[4-5]

杨木高温除湿干燥和常规干燥的干燥基准相同,见表 1^[6]。

表 1 杨木干燥基准

Tab. 1 Drying schedule for <i>Populus deltoids</i> lumber				
干燥阶段	含水率/%	干球温度/℃	干、湿球温差/℃	相对湿度/%
1	40~30	52	6	71
2	30~25	56	9	60
3	25~20	60	12	52
4	20~15	66	18	38
5	15 以下	74	24	29

通过测试系统的干燥时间、干燥能耗等指标,计算高温除湿干燥过程中除湿机回收的能量,和常规干燥过程中的排气热损。以除湿干燥能量回收率和除湿干燥节能率,来评估高温除湿干燥的节能效果。

除湿干燥能量回收率=除湿机回收的能量 Q_0 /除湿干燥能耗 $\times 100\%$

除湿干燥节能率=(常规干燥能耗-除湿干燥能耗)/常规干燥能耗值 $\times 100\%$

干燥过程中,测试项目包括:

- 1) 干燥室的平均温、湿度; 2) 木材含水率; 3) 各工艺阶段除湿量; 4) 除湿时间; 5) 除湿干燥能耗,包括除湿机(压缩机,除湿风机)、加热系统、干燥窑风机等的能耗; 6) 旁通率。旁通率指经旁通风阀的空气量(二次风量)与直接经过蒸发器的空气量(一次风量)的比值,对除湿效率和除湿比能耗有着显著的影响^[7]。根据预试验,在干燥的第一阶段选择 1.0,第二阶段选择 1.82。

2 试验结果与分析

2.1 除湿机回收的能量

在杨木高温除湿干燥的第一阶段,干燥室的平均温度为 52℃,除湿总量为 3.48 kg,相应的除湿能耗为 10.67 kW·h。

按除湿机风量为 2 000 m³/h 计,水和空气的比热分别按 4.174 和 1 kJ/kg·℃ 计,52℃ 时水的汽化潜热为 2 377.7 kJ/kg,一次风量为 1 163 m³/h,蒸发器两侧温差为 16℃,则第一阶段由除湿机回收的能量 Q_0 由 3 部分组成:

- 1) 空气中水蒸气凝结放出的汽化潜热 Q_1 :

$Q_1=3.48\times 2377.7\div 3600=2.30(\text{kW}\cdot\text{h})$
2) 冷凝水由 52℃ 降至 30℃ 放出的热量 Q_2 :
 $Q_2=3.48\times 4.174\times (52-30)\div 3600=0.09(\text{kW}\cdot\text{h})$
3) 空气经过蒸发器降温放出的热量 Q_3 :
 $Q_3=1163\times 3.5\times 1\times 16\div 3600=18.09(\text{kW}\cdot\text{h})$
则 $Q_0=Q_1+Q_2+Q_3=20.48(\text{kW}\cdot\text{h})$
同理,计算其他干燥阶段除湿机的回收能量(过程略),计算结果见表 2。

表 2 杨木高温除湿干燥能耗

Tab. 2 Energy consumption of high-temperature dehumidification drying for <i>Populus deltoides</i>				
干燥阶段	干燥能耗/(kW·h)		回收能量 Q_0 /(kW·h)	能量回收率/%
	除湿机能耗	总能耗		
1	10.67	66.13	20.48	30.97
2	7.60	35.12	10.39	29.58
3	9.94	67.16	11.21	16.69
4	1.03	99.03	1.02	0.01
5	1.02	112.00	0.99	0.01
总计	30.26	379.94	44.09	

由表 2 可以看出:

- 1) 在不同干燥阶段,除湿机的节能效果有明显差异,如第 1、3 阶段的能量回收率相差 14.28%,主要是因为前者的相对湿度比后者高 26.8%。
- 2) 木材含水率在 40%~25%(第 1~2 阶段)时,除湿机回收的能量明显高于其消耗的能量,平均能量回收率为 30.5%,开启除湿机具有节能作用。
- 3) 当木材含水率降至 25%~20%(第 3 阶段),除湿机回收的能量仅略高于其消耗的能量,能量回收率为 16.69%,节能效果明显下降。
- 4) 当木材含水率低于 20%(第 4~5 阶段),除湿机消耗的能量大于回收的能量,说明在干燥后期不适合开启除湿机。

本试验结果显示的除湿量和除湿机回收的能量相对较低,主要原因是干燥窑门的密封不够严密,导致干燥过程中部分蒸汽外泄,能量损失较大。另外,由于脱湿温度较高(尤其是干燥中、后期),部分已经脱湿的水分蒸发后,被循环风重又带入干燥窑内,使得除湿量减少,因此试验测得的除湿量低于实际干燥木材的除湿量。

2.2 高温除湿干燥与常规干燥的对比

2.2.1 干燥能耗

两种干燥方法的干燥总能耗、单位能耗等结果列于表 3。

表 3 高温除湿干燥与常规干燥的能耗对比
Tab. 3 Comparison of energy consumption between high-temperature dehumidification and conventional drying

干燥阶段	干燥时间/h		能耗/(kW·h)		单位能耗*		常规干燥	高温除湿干燥
	高温除湿	常规干燥	高温除湿	常规干燥	高温除湿	常规干燥	热损率/%	节能率/%
1	17.5	20.0	66.13	173.25	3.31	8.66	74.7	61.8
2	10.0	12.0	35.62	85.21	3.56	8.52	63.2	58.2
3	18.0	18.0	67.16	92.13	6.71	9.21	36.4	27.1
4	26.0	29.0	99.03	107.78	9.90	10.78	11.1	8.1
5	38.5	34.5	112.00	118.17	11.20	11.82	10.1	5.2
总计	110.0	113.5	379.94	576.54				
平均					6.33	9.61	41.8	34.1

* 单位能耗以平均每 m³ 木材降低 1% 的含水率消耗的电计, kW·h/(m³·%)。

从表 3 可以看出:

1) 两种干燥方法的时间基本一致。因为 HTR01 型高温制冷工质的供水温度较高, 两种干燥方法可选用相同的干燥基准, 故两种方法的干燥周期接近。

2) 杨木高温除湿干燥的能耗低于常规干燥, 节能率达到 34.1%。

在干燥前两阶段, 高温除湿干燥的单位能耗远低于常规干燥, 节能率较高, 而常规干燥热损率很高, 因此适合采用高温除湿干燥工艺。

在第 3 阶段, 高温除湿干燥的节能效果减弱, 常规干燥的热损率亦下降。高温除湿干燥应减少旁通率, 以提高除湿机的能量回收率和除湿干燥节能率(旁通率对除湿效率的影响将另文分析)。

在后两个阶段, 高温除湿干燥的单位能耗与常规干燥接近, 节能效果已不明显, 而常规干燥的热损率大幅下降, 平均只有 10.6%, 因此适合采用常规干燥工艺。

2.2.2 干燥质量

按照 GB/T 6491-1999《锯材干燥质量》, 对两种干燥方法的干燥质量进行了检验, 结果见表 4。

表 4 高温除湿干燥与常规干燥的质量对比
Tab. 4 Comparison of drying quality between the two drying methods

干燥方法	平均终含水率/%	干燥均匀度/%	厚度含水率偏差/%	残余应力/%
高温除湿	9.81	3.3	2.38	2.57
常规干燥	10.50	3.4	2.37	2.65

如表 4 所示, 两种干燥方法的干燥质量较好, 均未出现内裂等严重的干燥缺陷, 仅有少量表裂及端裂发生, 木材干燥质量达到国标 2 级标准。

3 结论与建议

1) 本试验条件下, 高温除湿干燥杨木的不同阶

段, 系统的节能效果存在差异。干燥前期开启除湿机的节能效果明显, 后期节能率下降。

2) 在同样的干燥基准下, 两种方法的干燥周期和木材干燥质量基本一致, 高温除湿干燥比常规干燥节能 34.1%。

3) 木材高温除湿干燥的发展方向是与常规干燥联合进行^[8]。当木材含水率在 25% 以上时, 适合采用高温除湿干燥工艺; 含水率在 20% 以下时, 适合采用常规干燥工艺。

4) 由于时间和设备条件所限, 只针对厚 40 mm 的杨木进行了高温除湿干燥和常规干燥的对比试验。以后还需对不同材种、材厚和除湿机性能(包括制冷工况、制冷工质、结构设计及功率等)进一步试验, 探寻联合干燥工艺及其匹配点, 降低木材干燥能耗, 促进除湿干燥的应用。

参考文献:

[1] 张璧光, 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.

[2] Sosle V, Raghavan G S V, Kittler R. Low-temperature drying using a versatile heat pump dehumidifier drying technology [J]. 2003, 21(3): 539-554.

[3] 谢大斌, 张璧光, 陈军, 等. 高温除湿与常规蒸汽联合干燥的试验与分析[J]. 干燥技术与设备, 2005, 3(3): 122-125.

[4] 张璧光, 宁炜. 蒸汽-热泵联合干燥木材能耗的实验测试与分析[J]. 华北电力大学学报, 2004, 31(6): 81-83.

[5] 张璧光, 李贤军. 榉木除湿干燥的能耗分析[J]. 林产工业, 2004, 31(1): 27-42.

[6] 高建民. 木材干燥学[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

[7] 周永东, 张璧光, 赵忠信. 木材热泵除湿干燥机节能工艺研究[J]. 北京林业大学学报, 1995, 17(1): 83-89.

[8] Paul B. Heat pump dehumidifier drying technology-status, potential and prospects[C] // Beijing: 7th International Energy Agency Conference, 2002: 219-230.

(责任编辑 向琴)