

降低除湿式木材干燥能耗初探

张璧光 赵忠信

摘要 介绍了除湿式木材干燥机分类,除湿机的合理选配和除湿干燥室的正确配置问题。分析了除湿机运行工况对能耗的影响,并提出了相应的降低能耗的一些措施。

关键词 木材干燥;除湿机;能耗

Preliminary Study on Reducing Energy Consumption of Wood Dehumidifying Drying

Zhang Biguang Zhao Zhongxin

(College of Forest Products and Engineering, BFU, Beijing 100083)

Abstract This paper described classification of wood dehumidifying dryers and how to make right choice for the dryers. Influence of working conditions of the dryer on power consumption were analysed and suggestions of reducing power consumption were provided.

Keywords Wood drying; Dehumidifier; Power consumption

除湿干燥虽然是一种节能的干燥技术,但同一台除湿机由于使用条件和操作水平的不同其能耗差别也是很大的。本文通过除湿干燥生产中反映的问题和一定的试验研究,就如何提高除湿机的工作效率,减少能耗做了一些初步的探讨。

1 按使用条件选配合适的除湿机

1.1 除湿机的分类

1.1.1 大、中、小型除湿机 按单机干燥能力的大小,除湿机可分为大型、中型和小型。单机干燥能力 $< 20 \text{ m}^3$ 木材的为小型; $30 \sim 60 \text{ m}^3$ 的为中型; $> 80 \text{ m}^3$ 的为大型除湿机。目前我国生产的除湿机都属于中小型,单机干燥能力一般都小于 60 m^3 木材。

1.1.2 单热源与双热源除湿机 除湿机按工作循环和功能的不同可分为单热源与双热源两大类。单热源除湿机如图 1(A),它只有一个制冷除湿循环,一个除湿蒸发器和一种功能(使湿空气脱水),当干燥室需要供热升温而不必除湿时,如果没有蒸汽或其它辅助热源,一般需要启动辅助电加热器,故电耗较高。双热源除湿机又称热泵除湿干燥机,如图 1(B)。它与单热源的主要区别在于它具有除湿和热泵两个工作

循环,有两个蒸发器(除湿蒸发器 2 和热泵蒸发器 8),两个热源(干燥室湿空气和大气环境),并具有使干燥室除湿和供热升温两种功能。当干燥室需要排湿时除湿系统工作,除湿蒸发器 2 中的制冷工质从干燥室的湿空气中取热,使湿空气中的水蒸气变成冷凝水而排除。制冷工质吸热后变为低压蒸汽,通过压缩机 1 送至冷凝器 4 放出热量,加热脱湿后的空气 6 使之变为热空气 7 又送回干燥室。从冷凝器流出的高压制冷剂通过膨胀阀 3 降压后,再回到除湿蒸发器继续除湿工作循环。除湿工作循环时只能回收空气脱湿时放出的热量,由于除湿机有少量散热损失,故除湿工作时难以实现使干燥室升温的目的。当干燥室需要升温时可启动热泵系统,热泵蒸发器 8 内的制冷工质从大气环境采热,通过压缩机送至冷凝器 4 放出热量,加热空气使干燥室升温。这种使空气由低温变为高温的功能称为热泵,热泵供热的多少取决于环境温度 T_0 和供热温度 T_1 , T_0 越高供热越多, $(T_1 - T_0)$ 越小压缩机能耗越低。热泵供热量 Q 与压缩机耗功 W 之比称为供热系数 $COP = Q/W$ 。COP 值越大节能效果越好,据文献[4],只要 $COP > 1$ 即优于电加热, $COP > 2$ 优于锅炉供热, $COP > 3$ 即节约一次能源。根据北京林业大学除湿干燥生产的试验统计数据,当环境温度 $T_0 > 10^\circ\text{C}$ 时,一般能达到 COP

收稿日期:1998-01-07

本文作者均为:北京林业大学教授,北京 100083

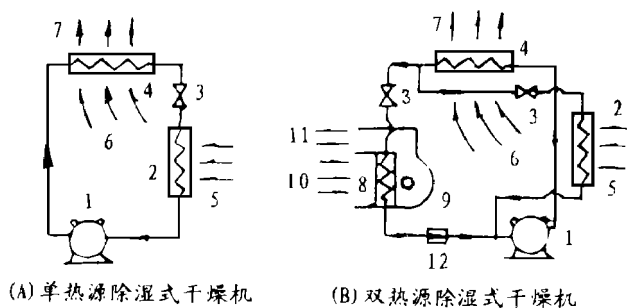


图1 除湿干燥机原理图

Fig. 1 Principle of dehumidifying dryer

1. 压缩机; 2. 除湿蒸发器; 3. 膨胀阀; 4. 冷凝器; 5. 湿空气;
6. 脱湿后干空气; 7. 送干燥室热风; 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

> 2 ; 当 $T_0 > 15\text{ }^\circ\text{C}$ 时, COP 可达 3 以上。一般情况下双热源比单热源除湿机节能 1/3 左右。

热泵和除湿两个工作循环可同时工作, 也可以互锁。可以共用一个压缩机和一个冷凝器, 也可以完全共用同一套制冷系统, 仅通过改变风阀控制蒸发器的热源取向来实现除湿和热泵两种功能。图 1(B) 所示为两套系统互锁, 共用压缩机和冷凝器的情况。

目前国内生产的除湿机多数为单热源, 北京冷冻机厂生产的 RCG 系列除湿机, 和溧阳平陵林机厂新近推出的新型 SCG 系列除湿机为双热源除湿机。

1.1.3 低温、中温和高温除湿机 除湿机按最高供风温度可分为低温 ($40\text{ }^\circ\text{C}$ 左右)、中温 ($50\text{ }^\circ\text{C} \sim 60\text{ }^\circ\text{C}$) 和高温 ($70\text{ }^\circ\text{C} \sim 100\text{ }^\circ\text{C}$) 型, 这主要与所选用的制冷工质和压缩机等部件有关。目前我国生产的除湿机大多为中温型, 上海桑菱能源所生产的 SGJ-5 型和北京冷冻机厂生产的 RCG30G 型为高温除湿机。

1.2 除湿机的选配

1.2.1 容量大小的选择

(1) 干燥产量大, 木材树种、板厚及初含水率基本一致的情况下宜选大功率除湿机。选用大容量除湿机可减少干燥室的数量, 减少投资和运行费用。例如一台干燥 50 m^3 木材的除湿机与有两台干燥 25 m^3 的除湿机相比, 前者的售价只有后者的 80%, 散热损失却减少 30% 左右, 并且随干燥室数量减少, 操作人员可相应减少。据测算, 采用干燥能力为 50 m^3 木材干燥机的生产成本可减少 24% 左右。

(2) 从组织生产的灵活性方面看, 干燥室数量不应太少, 除湿机容量不宜过大, 以便于不同树种, 不同板厚和不同初含水率的板材分窑干燥, 以提高干燥效率、减少能耗、降低成本。据资料[3], 从下列几种情况的成本测算可证实这一点。

① 4 cm 厚的榆木板材, 初含水率 30% 与 50% 的各 30 m^3 。若将其分装两台 30 m^3 的窑与混装于一台 60 m^3 的窑相比, 前者可降低干燥成本 14% 左右。

② 初含水率 50% 的榆木板材, 材厚 2.5 cm 和 4 cm 的各 30 m^3 , 若将其分装两窑干燥与混装于一台 60 m^3 的窑相比, 前者可减少干燥成本 20% 左右。

③ 材厚 4 cm 的榆木、松木板材各 30 m^3 , 初含水率均为 50% 要求干至 10%。若将其分装两窑干燥与混装于一台 60 m^3 的窑相比, 前者可降低干燥成本 25% 左右。

(3) 不能单凭产品广告上宣传的除湿机的干燥能力来决定干燥机的容量, 因为各厂家选用的试材条件 (树种、板厚、初含水率) 相差较大, 同功率除湿机的干燥量也会有较大的差别。

1.2.2 单热源与双热源除湿机的选择 双热源除湿机比单热源除湿机节能效果好, 而价格增加不多, 建议在年平均气温 $> 10\text{ }^\circ\text{C}$ 的地区采用双热源除湿机。对于年平均气温较低的地区, 以及有蒸汽或木废料燃烧炉作辅助热源的情况, 可选用单热源除湿机。

1.2.3 中温与高温除湿机的选择 根据北京林业大学所积累的中温、高温除湿机的生产试验资料分析, 当干燥条件 (材种, 材积, 材厚, 初、终含水率) 相同时, 中温除湿机的小时平均能耗比高温除湿机大约低 25% ~ 30%。而高温除湿机的干燥时间要比中温除湿机缩短 1/3 左右, 因此高温除湿机的平均节能率比中温除湿机略高一些。若干燥厚的难干材, 高温除湿机的优越性明显些; 而干燥薄的易干材时其优越性相对降低。如果用蒸汽或废料燃烧炉作辅助热源, 选用中温或高温除湿机均可。

2 除湿干燥室的合理配置

除湿干燥室的配置往往是容易被忽视的环节。从表面上看除湿干燥室比蒸汽干燥室简单, 但若配置不当也是影响干燥效果的主要原因之一, 据初步调查, 主要有以下几方面的问题:

(1) 干燥室材容与窑容的比例不恰当, 空气循环速度不匹配。据国外有关资料介绍, 除湿与蒸汽干燥相比, 窑容与材容的比例要取得大一些, 而气流循环速度却要小一些。

(2) 许多干燥室未设置辅助排气扇, 因而在干燥初期干燥室不能进行适当的换气, 从而导致干燥初期干燥室湿度过大, 甚至出现积水和木材霉变现象。

(3) 除湿干燥室的保温密闭性比蒸汽干燥室要求高, 但许多除湿干燥室及大门的保温密封性不好, 使

散热损失增加,除湿干燥室达不到预定的温度。

(4)绝大多数除湿干燥室没有增湿设备,往往在干燥厚度> 5 cm 的硬阔叶树材时不易保证质量。在没有蒸汽喷湿处理的情况下,以采用小型管道泵与水滴雾化器配合的简易增湿装置。

3 改进除湿干燥机的运行操作

3.1 除湿机运行工况对能耗的影响

3.1.1 流经除湿蒸发器的空气量对脱水能耗的影响

木材干燥过程中干燥室内的空气温度和相对湿度随含水率而变化。干燥初期空气温度低而相对湿度高,干燥后期温度高而湿度低。如果除湿机的制冷量和流经蒸发器的空气流量不变,就会出现除湿量越来越小,甚至为零的情况,如表 1 所示。由表 1 所列数据可看出,当除湿机制冷量 Q_0 、旁通率 i 和空气流量

表 1 湿空气状态对脱湿量的影响

序号	t ($^{\circ}\text{C}$)	φ (%)	Q_1 (kW)	Δd_1 (g/kg)	备 注
1	40	90	3	8.0	$Q_0=26\text{ kW}$ $i=G_2/G_1=1.1$ $G_1=5\,900\text{ kg/h}$ 表中 t 为空气温度; φ 相对湿度; Q_1 将空气冷却至饱和所需的制冷量; Δd_1 为每千克空气流经除湿蒸发器的脱湿量; G_1 为测试期间流经蒸发器的空气流量; G_2 为未流经除湿蒸发器的旁通空气流量; $i=G_2/G_1$ 称空气旁通率。
2	45	60	14	5.7	
3	50	50	19	2.4	
4	59	46	28	0	

G_1 不变时,随空气温度增高而相对湿度的降低,用于空气冷却至饱和的制冷量 Q_1 增加而除湿量则逐渐减少,当 $t=59\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi=40\%$ 时,将空气冷却至饱和所需的制冷量为 28 kW,而除湿机的制冷量只有 26 kW,所以在这种情况下空气流经除湿蒸发器后,只降温而不除湿,造成能量的浪费。改善这种状况的办法:一是使湿度小的空气先预冷,再流经除湿蒸发器,例如除湿蒸发器前加装水冷式、空气回热式或热管式等各种用于预冷的换热器,以便增加空气的相对湿度。另一种办法是在除湿蒸发器前设置风量控制阀,如图 2 所示,随着空气温度增高、湿度降低,逐渐关小风阀,减少空气流量 G_1 ,增大旁通率 i ,因为减少 G_1 就可减少用于冷却空气至饱和的制冷量 Q_1 ,从而增加用于脱湿的制冷量 Q_2 ($Q_0=Q_1+Q_2$),达到增加空气在该状态下除湿量的目的。通过理论模拟分析和试验测试都可证实^[1,2],在每一种空气状态(t , φ)下都存在一个最佳的空气旁通率(最佳流量 G_1),例如当空气温度 $t=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,湿度 $\varphi=60\%$ 与 80% 相比,大约需减少空气流量的一半,可得到此状态(t

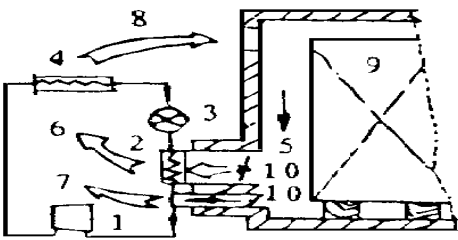


图 2 装有风阀的除湿机原理图

Fig. 2 Principle of dehumidifier with damper

1. 压缩机; 2. 除湿蒸发器; 3. 膨胀阀; 4. 冷凝器; 5. 湿空气;
6. 脱湿后干空气; 7. 旁通空气; 8. 干热风; 9. 材堆; 10. 风阀
= 35 $^{\circ}\text{C}$ $\varphi=60\%$) 下的最大除湿量。

3.1.2 压缩机压缩比和蒸发温度对能耗的影响³

如图 3 所示,它显示了压缩机压缩比和蒸发温度对脱水能耗的影响。该图是在空气温度 $t=35\text{ }^{\circ}\text{C}$, 湿度 $\varphi=60\%$ 及空气旁通率 $i=5$ 的情况下绘制的,图中的几条曲线分别表示不同压缩比($Yb=2,3,4$)的情况下能耗与蒸发温度的关系。由图 3 看出,除湿机单位脱水能耗随压缩比 Yb 的增大而明显增加,同时也随蒸发温度的上升而增大,但在压缩比较大(如 $Yb<2.5$ 以后)时,蒸发温度的影响较小可忽略不计。

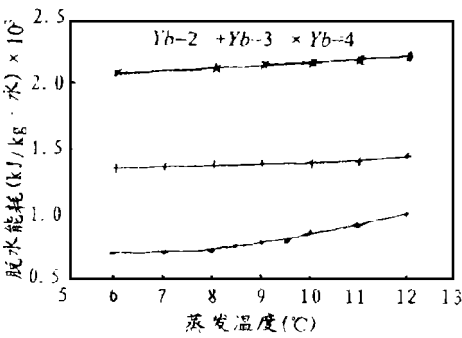


图 3 压缩比及蒸发温度对能耗的影响

Fig. 3 Influence of compression ratio and evaporations temperature on power consumption

3.2 改进除湿干燥的运行操作减少能耗

3.2.1 设置除湿风量控制阀 随空气中含湿量的降低逐渐减少经过除湿蒸发器的空气量,以提高除湿效率。风阀的开度随除湿机制冷量和空气状态而变,要通过多次试验才能确定。目前我国绝大多数除湿机没有风量控制阀,不少除湿机靠定时器来控制除湿机的开停时间,干燥初期除湿时间长一些,后期则短一些。从干燥工艺的角度看这种管理方法比较粗放,因而影响除湿的效率及能耗。

3.2.2 适当控制压缩机的压缩比 由于除湿机的能耗随压缩比的增大而明显增加,故控制压缩比是减少

(下转第 44 页)

5 经济效益的粗略评估

本文仅就用电量和蒸汽用量粗略评估采用新工艺所获的经济效益。

表 4 干燥生产统计(新工艺)

Tab. 4 Statistics of drying production with new technology					
时间	树种	装窑量 (%)	干燥时间 (h)	用电、汽时间 (h)	干燥费用 (元/m ³)
A 窑 容量 30m ³					
95 年 5 月 2 日	柞木	30.5	78	72	47.2
5 月 7 日	柞木	30.3	76	71	46.9
5 月 12 日	柞木	29.8	80	73	49.0
5 月 18 日	柞木	31.0	80	72.5	46.8
5 月 22 日	柞木	31.2	78	71.0	45.5
5 月 26 日	柞木	30.5	77	71.5	46.9
5 月 30 日	柞木	31.0	77	72	46.5
B 窑 容量 50m ³					
95 年 5 月 5 日	柞木	49.3	82	75	45.6
5 月 11 日	栲树	50.9	86	80	47.2
5 月 16 日	栲树	50.2	89	81	48.4
5 月 22 日	栲树	49.8	88	80	48.2
5 月 27 日	栲树	50.0	87	80	48.0
5 月 31 日	柞木	51.1	83	78	45.8

注:板厚 24 mm。

从表 4 可知,干燥 1 m³ 柞木的费用为 46.97 元,而用常规工艺时,干燥的费用约需 80 元,平均每立方米可节省干燥费用约 33 元。

板材严格按标准堆垛,干燥后的木材基本上无弯曲、内裂、纵裂、皱缩、炭化和变色等缺陷,原先有裂缝

的干燥后有小范围的扩展。参照国家标准 GB 6491—86,达到二级干燥质量等级。采用新工艺进一步提高了干燥材的尺寸稳定性,见表 5。

表 5 用新工艺和常规工艺干燥的木材尺寸稳定性

Tab. 5 Dimensional stability of lumber dried with new and conventional					
组别	干燥工艺	试材树种		平均湿胀率(%)	平均干缩率(%)
A	新工艺	柞木	弦向	1.08	1.30
			径向	0.75	0.95
B	常规工艺	柞木	弦向	1.23	1.45
			径向	1.05	1.18
A	新工艺	栲树	弦向	1.10	1.30
			径向	1.05	1.02
B	常规工艺	栲树	弦向	1.32	1.75
			径向	1.13	1.20

6 结论

从试验结果并经较长时间的生产实践,对硬阔叶树板材的干燥质量较好;干燥周期介于高温干燥和常规干燥之间,而且进一步提高了木材的尺寸稳定性。

新工艺在什么情况下由高温转入常规干燥,则要根据不同树种、材料厚度和用途来决定。

新工艺对一般的蒸汽加热强制循环的干燥窑,只要气密性、保温性较好的均可进行,如:顶风机型、侧向通风型和端风机型的干燥窑。

(上接第 37 页)

能耗的一条重要途径。实际操作中应通过两方面来控制压缩比,一方面通过调节膨胀阀的开度来调节蒸发压力;另一方面可通过风量来控制。目前我国生产的除湿机有不少未装热力膨胀阀,像冰箱一样用毛细管来代替,但它调节制冷剂流量的作用很小。还有不少除湿机未装高、低压表和压力控制器,不能有效控制压缩比,这些都是影响除湿能耗的因素。

3.2.3 适当的停机焖窑可减少能耗 进入干燥中期以后,如果除湿机功率选择恰当,干燥室的相对湿度下降较快,如果采取间断停机焖窑措施,可减少能耗,因除湿机停机后木材中水分继续蒸发,干燥室的相对湿度逐渐上升,当湿度上升到高于此阶段基准所要求湿度的 10%~15%时,开机除湿可提高除湿效率减少能耗,同时停机焖窑期间还使木材表面得到一定的软化处理,有利于提高干燥质量和干燥速度。

3.2.4 加强工人培训提高操作水平 据调查目前多数除湿机的操作人员素质偏低,不按除湿机操作规程和除湿工艺操作,而是凭经验、凭感觉行事,责任心差,往往造成不应有的能量浪费。

4 结束语

除湿干燥在我国的应用已有十几年的历史,但目前除湿机以仿制国外产品的居多,真正独立设计制造的较少,往往达不到产品应有的水平。由于除湿干燥涉及空调制冷、热工学及木材干燥等多门学科,目前相关的基础理论研究还很薄弱,新的高温制冷工质还缺少相关的性能参数,也缺乏配套的专用压缩机,而且我国除湿机生产还没有行业标准,缺乏统一的管理。以上这些因素是除湿机进一步发展和改进提高所面临的问题。总之关于如何改进除湿机的设计和改善除湿干燥操作运行的研究,在我国还任重道远。

5 参考文献

- 张璧光等. 空气旁通率对热泵除湿干燥机能耗的影响. 全国高校工程热物理第五届学术会文集, 大连出版社, 1994, 149~152
- 周永东等. 木材热泵除湿干燥节能工艺的研究. 北京林业大学学报, 1995(1): 83~89
- 李晓玲. 木材热泵除湿干燥最佳匹配方案分析. 北京林业大学毕业论文, 1992, 105~116
- 张璧光等. 除湿干燥的节能分析. 林产工业, 1995, 22(6): 35~38
- 霍光青. 高温双热源除湿干燥机运行工艺初探. 林产工业, 1997, 24(1): 10~12