

国外木材干燥节能技术的研究

滕通濂 唐一夫

(中国林科院木材工业研究所)

前言

木材干燥要耗用大量能源,从原木到产品,干燥耗能约占加工总耗能的40~70%。常规窑干1万立方米厚度为5厘米的红松板材,正常耗能折合标准煤571吨,但生产中的非正常的热损失有时则超出上述数字1倍。据估计,全国每年需干燥的木材约为三千万立方米左右。由此可见,研究木材干燥节能技术和开发干燥新能源,对于节约能源,降低生产成本,提高经济效益均有重要的意义。

近年来,工业发达国家十分重视木材干燥节能技术的研究,并取得了成果,如太阳能开发利用、除湿干燥节能方法以及改进常规窑的设计等。本文综合分析国外近年来节能技术研究、应用现状及其特点,供进一步开展此项研究工作时参考。

一、十分重视太阳能的开发利用

最早设计的小型太阳能干燥窑几乎都是温室型的,集热效率约为15%,改进后的温室型太阳能干燥窑增加了储热器,在集热板上增设了反射盖板,提高了热效率(见图1)。

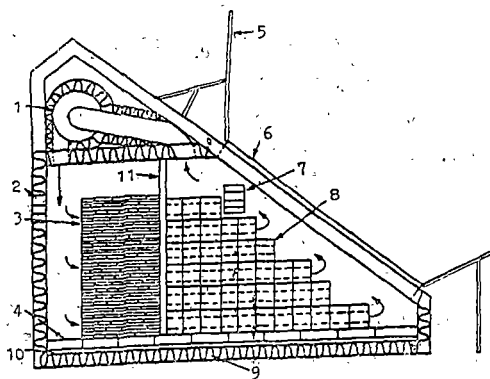


图1 装有热储存器和反射盖板的太阳能干燥室

1. 风机 2. 进气道 3. 材堆 4. 混凝土块 5. 反射盖板 6. 玻璃窗 7. 排气道 8. 混凝土砖 9. 玻璃纤维 10. 聚苯乙烯泡沫 11. 过滤器

储热器是由中央有圆孔的混凝土砖砌成一直角三角形结构,其斜边与集热器平行,并将斜面漆成黑色,以增加吸热和热交换的作用。反射盖板是由贴铝箔的胶合板和复合塑料板组成的,在晴天可作反射镜,雨天或夜间可作集热器盖板,防止从室内散热。干燥二炉4/4英寸厚的美国鹅掌楸木材试验结果表明,含水率从95%干到8%,分别为28天和33天,电能消耗分别为561kw·hr和641kw·hr,干燥质量良好,无表裂和皱缩,无明显残余应力。这种太阳能干燥窑对小型木材加工厂是有吸引力的。

另一种大阳能干燥窑(图2),铝罐型的集热器装在干燥窑的外部,也称外部集热器型太阳能干燥窑。每一个集热器由336个切成两半的铝罐组成(见图3),集热器材料费用约6.50美元/平方英尺。从美国南伊利诺伊州的太阳能干燥窑的试验结果表明:5月份集热器平均效率为74%,随出口温度的降低而升高。干燥1英寸厚的美国鹅掌楸板材从生材至终含水率15%,在夏季和初秋,窑的效率分别为90%和67%,干燥时间分别为8天和10天。干燥速度是气干的2~2.5倍,干燥质量很好,收缩率、弯曲和降等损失与气干材无明显区别,但太阳

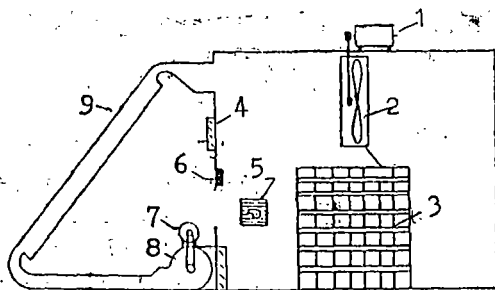


图2 太阳能干燥室的主要组成

1. 电机 2. 风机 3. 材堆 4. 进气口 5. 排气口 6. 湿度计 7. 电机 8. 风机 9. 太阳能集热器

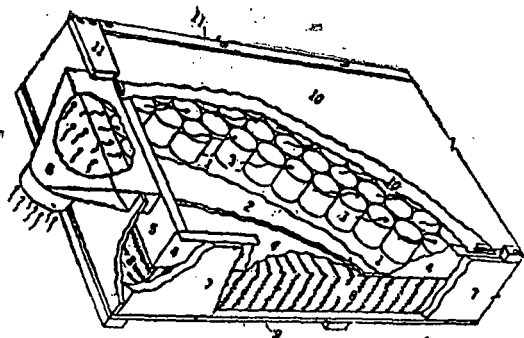


图3 铝罐型太阳能集热器

1. 铝箔 2. 胶合板 3. 铝罐盒 4. 集热器托盘
5. 集热器托盘端面 6. 空气入口 7. 外壳 8. 玻
璃纤维 9. 胶合板 10. 双层玻璃纤维板 11. 外
壳

能干燥材颜色稍深于气干材。太阳能干燥的电能消耗是常规窑干的 $1/4$ ，冬天效果较差，窑的效率只有29%，如果要求干到较低含水率($<12\%$)时，这种窑的某些优越性就不明显^[2, 4-7]。

二、除湿干燥技术发展迅速

近年来，除湿干燥在西欧、北美、加拿大、日本以及东南亚得到迅速发展和广泛应用。许多国家已有专门生产除湿干燥设备的工厂和研究机构，日本除湿干燥机已占干燥设备的12%，法国除湿干燥仅次于常规窑占第二位，意大利生产的太阳能一除湿干燥窑已在东南亚国家广泛使用。80年代初，我国开始引进除湿机并有少量生产应用。

第一代除湿干燥机的工作温度约为 $30\sim 40^{\circ}\text{C}$ ，称为低温除湿干燥机，常用氟里昂12和22二种制冷剂。干燥机容量从100至5000板英尺，壳体绝热层一般为3英寸厚玻璃纤维层，热阻 R 达到20至35。干燥时，一般是预先设定一致的干球温度，根据不同含水率阶段设定不同的相对湿度，初期含水率高，相对湿度设定高一些，可避免难干树种干燥初期产生缺陷，随着含水率的降低，设定的相对湿度逐步降低。干燥开始后窑内未能尽快达到预定温度时则由辅助热源供给，当温湿度升到设定的温湿度值时，除湿机才开始工作。用低温除湿机（干燥温度 34°C ）从初含水率60%干到16%，比常规窑干（干燥温度 $66\sim 82^{\circ}\text{C}$ ）减少能耗68%~46%，干燥降等少，设备投资少，容易操作。低温除湿干燥速度慢，干燥至纤维饱和点以下的木材时电能消耗增多，Chon (1982)干燥云杉方材从52%干到25%需要125kw-hr，而从25%干到15%还需要138kw-hr，干燥20毫米厚的白蜡木材和30毫米厚的铁杉木

材，干燥时间为常规窑干的2倍。

改进热泵，加装旁通管的冷却装置，可使热泵压缩机的马达在较低温度下工作。把干燥温度提高到 50°C 左右的除湿机称中温除湿机，选用在高温下工作的制冷剂R114，可使干燥机的温度提高到 80°C 的称高温除湿机。英国一家公司生产的高温除湿机，干燥温度为 $35\sim 80^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度在100%~20%范围调节，可以干到含水率低于20%，干燥时间相当于常规窑干。但比常规窑节约能耗，分别为：干燥针叶树材时为67%，阔叶树材时为43%。中、高温除湿干燥机受到普遍重视，不仅节能而且保证干燥质量，干燥速度也能被人接受，不需要锅炉，辅助热源也可采用经济的太阳能或废材，因此，对中小企业有很大吸引力^[2, 3, 8]。

三、太阳能一除湿干燥综合节能效果显著

除湿干燥比常规窑干可节能30~70%，但除湿干燥辅助热源使用电能，因而费用较高。为了发挥太阳能和除湿干燥两种干燥方法的优点，在太阳能干燥窑中增设了高温除湿机，组成太阳能一除湿联合干燥窑（见图4）。既解决太阳能干燥窑昼夜温

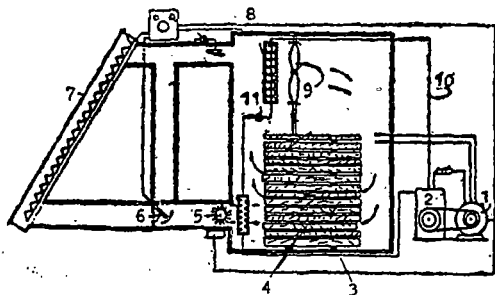


图4 太阳能一除湿干燥窑

1. 电机 2. 压缩机 3. 回流畅路 4. 材堆 5. 风
机 6. 风门 7. 太阳能集热器 8. 冷凝器 9. 风
机 10. 流出管路 11. 控制阀

差较大和阴雨天供热问题，也可利用太阳能作为除湿干燥机的辅助热源，使除湿干燥变得更经济。与太阳能干燥窑比较，减少了干燥过程对气候的依赖性。当窑内温度低于集热器温度时，集热器的风机启动，向窑内供热；窑内相对湿度大于设定值时，除湿机启动，开始除湿。在夜间或阴雨天，窑内相对湿度大于设定值时，集热器风机仍然启动，但风门关闭，使空气从旁路流过直接进入窑内，然后经蒸发器除湿。

图4为太阳能一除湿干燥试验窑，容积约为

500板英尺 (1.2m^3)，为便于在干燥后期对木材进行调湿处理，在窑的外部设置一台电加热蒸汽发生器，功率7.5kw，蒸汽发生量25磅/小时。用这种窑干燥4/4英寸的鹅掌楸方材，从含水率100%干到7%，干燥时间为8天(夏季)到18天(冬季)。在全年中窑内实际达到的最高温度为79℃，干燥降等损失平均每千板英尺 (2.3m^3) 为3.60美元，25毫米厚的红栎板材，含水率从77%干燥到8%，时间为22天(夏季)到36天(冬季)^[9]。太阳能一除湿干燥窑的干燥速度比太阳能干燥窑快，也比常规除湿干燥快10%以上，其能耗也仅为太阳能干燥的82%，消耗电能比相近容积的除湿干燥试验窑干燥25毫米厚的硬槭木材要少。

太阳能一除湿干燥受季节影响仍然很明显，干燥4/4英寸鹅掌楸材的冬季干燥时间为夏季的3倍。为减少季节变化的影响，新增设了一组太阳能集热器(面积为原来的2倍)和储热器，在除湿机蒸发器上增加热回收装置，以减少能耗(见图5)。储热器由河卵石组成，河卵石直径为25到75毫米，总体积为 3.6m^3 ，能在无太阳辐射时向窑内(容积为 1.2m^3)提供一天的热能。图6所示为热回收系统，热管型热交换器装在除湿机前面，经过冷却再流经蒸发器的湿空气更接近于饱和点(从A到B)，蒸发器能除去湿空气中更多的水分(B到C，D到E)。热管的一端从流经它的湿空气中所吸收的热量将由热管的另一端释放给经除湿后的干空气(E到F)。干燥窑有两个独立的控制系统，除湿机控制系统和干燥窑/集热器/储热器控制系统。除湿机由放置在窑内的湿度计来控制，当窑内相对湿度大于设定值时，除湿机启动，反之则关闭，湿度的设定值随木材含水率的减少而减少。干燥窑/集热器/储热器系统由温差来控制，通过连续测量窑内温度、集热器进口温度、储热器顶部温度与设定值进行比较，然后根据温差来控制风机和风门的动作，当窑内干球温度低于设定值时，首先由太阳能集热器向窑内供热，如果集热器的热量不足，则由储热器向窑内供热，如果窑内干球温度大于设定值时，且集热器的温度大于储热器的温度，就由集热器向储热器供热。装有储热器和热回收装置的太阳能一除湿干燥窑干燥4/4英寸厚的鹅掌楸木材时表明，含水率从92%干到3%，干燥时间为8天(夏季)到11天(冬季)，相当于常规蒸汽干燥(6~8天)，干燥质量良好，材色比常规干燥的稍浅，无表裂、端裂和皱缩。25毫米厚的红栎板

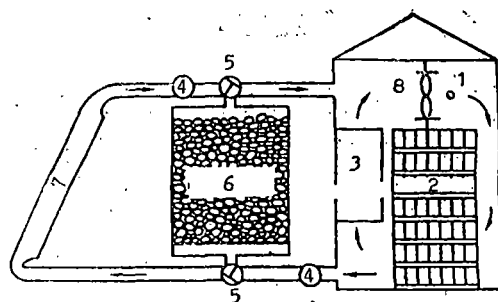


图5 带有储热器和热回收系统的太阳能一除湿干燥试验窑

- 1.蒸汽 2.材堆 3.除湿机和热回收系统 4.风机
- 5.风门 6.储热器 7.太阳能集热器 8.风机

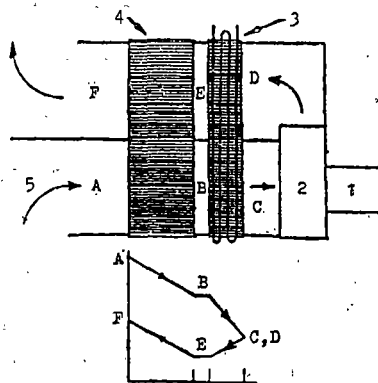


图6 除湿机热回收系统

- 1.电机 2.风机 3.蒸发器 4.热管 5.窑内气体

材，材积 1.2m^3 ，含水率从85%干燥到8%，时间为20天(夏季)到24天(冬季)，干燥质量良好，降等损失少于1美元/ m^3 。改进后的新窑比旧窑，25毫米厚红栎板的平均干燥时间从27天减少到21天，因季节变化而产生的干燥时间最大差异从14天减少到4天。能量效率增加30%。所以，在太阳能资源丰富和电费合理的地区有广泛的用途，为干燥硬阔叶树材提供一种能效较高的方法。

四、常规窑干节能技术研究和应用

1. 常规干燥窑的改进

改进干燥窑设计，提高窑壳绝热性能，减少壳体损失。砖砌壳体热损失仅次于蒸发水分的耗热量，占第二位，据计算实体砖砌窑总传热系数为0.9千卡/平方米·时·℃，空心砖—空气层—实体砖三层结构壳体传热系数为0.56千卡/平方米·时·℃，改用金属壳体(10厘米玻璃棉绝热层)总传热系数可降至0.32千卡/平方米·小时·℃，则壳体热损失减少64%，总能耗减少11.8%^[1,2]。采用气密和绝热性能更好的隔热保温材料，如硬质

聚氨酯发泡塑料等,效果更显著。

2.采用热回收装置

高温干燥时从干燥窑排出的湿空气有很大的热回收潜力。Kent等人研究三种不同的热回收系统(见图7),干燥机的排气温度分别为250°F、300°F和350°F,排气速度为42和82立方英尺/分钟,热交换效率为35~62%。翅片管型热交换器能回收

空气中的显热,空气温度和流速对其效率影响不明显。翅片热管型和交叉翅板型热交换器的效率随气温度升高而增加,从干燥全过程看,翅片热管型比交叉翅板型的热回收效果更理想。前者适合于将热传递给液体,而后两者更适合于空气对空气的热交换^[10]。

3.选用合理的干燥条件

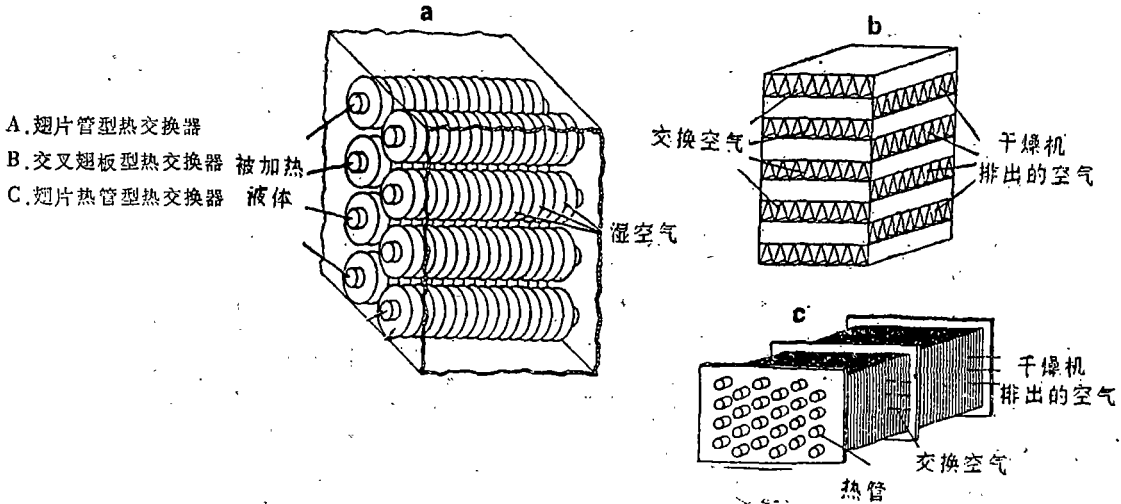


图7 三种热交换器

对适合高温干燥的一些树种如鹅掌楸、白蜡、椴木、软槭树等,采用高温基准比常规基准节能。对不适于高温干燥的树种,如黑樱桃、硬槭树、山毛榉等,分别采用中—高温基准、连续升温或气干—高温联合基准来缩短干燥时间,节约能耗。难干硬阔叶木材,则采用低温预干(气干)—窑干联合基准,也能显著缩短干燥周期,节约能耗^[12, 13]。循环气流速度对初始的干燥速度和终了的木材含水率的均匀性有很大影响,应根据树种和不同含水率阶段,调节合适的风速以改善木材干燥效果又能节省电能。据估算,常规窑干初期阶段风速采用2~3米/秒,后期采用1米/秒左右,可节约电能30%左右。

4.改进干燥过程操作,实现自动控制。

窑干过程依靠操作人员手工操作精度差,容易出错,而且先进的干燥工艺和连续基准,依靠手工调节难以实现。因此,北美、西欧新建造的木材干燥窑几乎都配备有半自动或自动控制装置。当前,自动控制已发展到第3代产品—电子计算机控制装置,干燥过程中连续地自动检测木材物理状态的装置更加完善,因此,控制更精确。西德希尔德布朗特木材技术公司和布鲁纳计算机公司生产的木材干燥机自动控制装置,通过电子计算机和变频器

组合,便能根据树种、厚度、含水率、干燥条件和干燥阶段等计算出最经济的风速,实现自动控制,达到节能的目的。

5.改善木材渗透性,缩短干燥周期,节约能源。

据对黑胡桃木的研究,在115℃温度下汽蒸4小时,木材长度方向上的渗透性增加560%,而对边材的渗透性几乎没有什么影响。对于两种汽蒸温度(100℃和115℃)和四种汽蒸时间(1、2、3、4小时)的试验表明。心材渗透性随温度升高和汽蒸时间的延长而增加,但对边材影响很小。115℃汽蒸后,心材长度方向上的渗透性是100℃汽蒸时的3倍,在100℃下汽蒸4小时,可将黑胡桃木边材对心材的渗透性比率从24,000倍降低到10,000倍,在115℃下汽蒸4小时则降低到4000倍。对于渗透性差且抽提物多的树种,汽蒸预处理能明显地增加其渗透性,从而有利于加速干燥,节约能源^[14]。

冷冻预处理也能改变木材的渗透性,据对黑胡桃木的研究,在-100°F下冷冻1小时后,径向(心、边材)的渗透性显著增加,但长度方向无明显变化,边材径向渗透性平均增加43.8%,心材增加了33.2%,预冷冻后心材的干燥速度比未冷冻的快28.1%(从生材干到含水率46%)。还有人研究

激光打孔和加压预处理来增加木材的渗透性,也从而加快了干燥速度。

参考文献

- (1) 何定华, 1988, 锯材窑干节能途径的探讨, 林产工业, 1 (23—25)。
- (2) 何定华, 滕通源, 1983, 木材干燥, 七十一八十年代国外林业技术水平文集, 中国林科院情报所。
- (3) Kauman, W.C., 1986, 木材干燥技术讨论会, 中国林科院木材所, 木工学会。
- (4) Chen P.Y.S., Workman, E. C. Jr. and Helton, C.E., 1978, How to build a collector for a solar kiln with aluminum cans, FPRS News-Digest, Processes, Drying and Storage, February, File, G-1.14, 4p.
- (5) Chen P.Y.S., 1981, Design and tests of a 500 B.F. solar kiln, Forest Prod. J., 31(3), 33-38.
- (6) Chen P.Y.S., 1989, Design and evaluation of a low-cost solar kiln, Forest Prod. J., 39(1), 19-22.
- (7) Chen P. Y. S. and Helton, C. E., 1985, Design and tests of a solar kiln with a built-in heat storage unit and a collector cover-reflector, Alternative Energy in the Midwest Research and Applications, Conference Proceedings, Vol. 1.
- (8) Chen P. Y. S. and Helmer, W. A., 1982, Principles of dehumidification lumber drying, Forest Prod. J., 32 (5), 24-28.
- (9) Chen P.Y.S. and Rosen, H.N., 1982, Experimental solar-dehumifier kiln for drying lumber, Forest Prod. J., 32(9), 35-41.
- (10) Kent A.C., Rosen, H.N. and Crotty, D.A., 1981, Energy conservation in wood dryers using vent air energy recovery devices, Forest Prod. J., 31(2), 43-49.
- (11) Little R.L., William W.M. and Richard L.T., 1986, Design of a computer based controller-recorder for an experimental dry kiln, Forest Prod. J., 36(11/12), 72-74.
- (12) Rosen, H.N., 1980, High temperature initial drying of wood: potential for energy recovery, Forest Prod. J., 30(1), 29-34.
- (13) Rosen, H.N., 1979, Energy requirements in high temperature and conventional kilns, In Proceedings of the Symposium on High Temperature Drying of Hardwoods.
- (14) Chen P.Y.S. and Workman, E.C., Jr. 1980, Effect of steaming on some physical and chemical properties of black walnut heartwood, Wood and Fiber, 11(4), 218-227.

(上接第47页)

4. 组坯、热压: 组坯既可以单方向铺装, 也可以交叉放置, 根据产品最终要求确定。热压有两种方式, 一种是模压成型, 一种是连续带式热压 (如图1, 图2)。对模压成型, 可以根据需要, 将模子设计成多种形状, 不仅可以压制板材, 还可以压制柱材、工字梁、弯曲构件及其它所需的任何形状。对连续压机, 也可根据产品要求, 设计多种导向型模, 压制出不同截面形状, 可为直线型也可为曲线型的产品。国外研究者认为, 采用模压方法时, 温度控制在120℃, 时间20分钟, 压力4.0MPa, 可以获得胶合良好的重组木产品。

参考文献

- (1) 王恺、肖亦华, 1989, 重组木国内外概况及发展趋势, 木材工业, No. 1: 40—43.
- (2) 日本特许公报, 割裂木材による加压集成材の制造方法, 日本, 昭63—2762, 昭和63年 (1988) 1月20日。
- (3) Coleman J.D., 1981, A "reconsolidated" wood for structural purposes, Division of chem. tech. research review, CSIRO, Australia.
- (4) USP, Reconsolidated wood product, 4, 232, 067, 1980.