

讨论与建议

木材柔性真空干燥技术的发展与应用

王 宵, 高瑞清, 李晓玲

(中国林科院木材工业研究所; 国家林业局木材科学与技术重点实验室, 北京 100091)

摘要: 介绍国内外木材柔性真空干燥技术的研究进展和应用现状, 在分析现存问题的基础上, 提出完善柔性真空干燥技术的建议, 以期解决珍贵木材、大规格材、异型材等的干燥难题, 实现这些木材的高质量、快速干燥。

关键词: 木材干燥; 柔性; 真空

中图分类号: TS652

文献标识码: B

文章编号: 1001-8654(2013)02-0038-04

Review of Development and Application of Flexible Vacuum Wood Drying Technology

WANG Xiao, GAO Rui-qing, LI Xiao-ling

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry;

Key Lab of Wood Science and Technology of State Forestry Administration, Beijing 100091, China)

Abstract: The authors summarized the current status of flexible vacuum wood drying technology research and its applications. They also analyzed the existing problems and provided suggestions to improve drying quality and drying rate of valuable wood, large-sized timber and abnormal-shaped wood and furniture parts.

Key words: wood drying; flexible; vacuum

在木制品加工过程中,干燥是必不可少的环节。目前,国内外木材干燥主要以常规干燥方法为主,然而木构件使用的大规格材、古建筑维修使用的大径级原木、红木等珍贵家具原材料、木制工艺品毛坯等异型材,很难采用常规干燥方法进行干燥。与普通规格材相比,虽然此类木材的数量较少,但亦属于市场必需品,且产品附加值高,数量呈日益增多的趋势,因此,亟需一种安全、高效的干燥方法。

真空干燥技术是一种高效、优质的木材干燥方法,对于渗透性较好的阔叶树材,特别是厚材,干燥速度和质量上的优越性十分明显。如干燥 60 mm 厚的

榆木规格材,真空干燥的速度是常规干燥的 6 倍以上^[1]。真空干燥技术还可用于不宜采用常规干燥法处理的特殊木制品的干燥,尤其适用于贵重木制品的干燥^[2]。

然而,现有的木材真空干燥设备复杂,投资成本高,制造工艺难度大,设备的体积较小,不适宜大规模的工业化生产,且木材装卸不便,木材终了含水率均匀性较差^[3]。同时,真空度愈高,真空罐内的干燥介质愈少,加热材堆的难度亦愈大。为解决这一问题,通常采用先在常压下对流加热,然后进行真空干燥的间隙式真空干燥工艺,但会导致干燥周期延长,能耗增加。

柔性真空干燥技术可弥补现有真空干燥技术的缺点,其在真空干燥设备、工艺的基础上进行了如下改良:

收稿日期: 2012-12-12; 修改日期: 2013-02-05

基金项目: 引进国际先进林业科学技术计划(2009-4-54)。

作者简介: 王宵(1989—), 女, 中国林科院木材工业研究所硕士研究生。

通讯作者: 高瑞清, 男, 中国林科院木材工业研究所副研究员。

1) 载体:将刚性真空罐体改为柔性装载装置,如抽真空蒸煮袋;

2) 加热方式:柔性真空干燥是将木材置于防水密闭的柔性装载装置中,对包装完毕的木材进行抽真空处理,再将其放入水浴箱($\leq 60\text{ }^{\circ}\text{C}$)中加热,从而使木材在连续真空状态下进行干燥。该方法对被干燥木材的形状、规格无严格限制。

基于此,笔者对国内外木材柔性真空干燥技术的研究与应用进展进行了总结和分析,旨在探索难干材、异型材和珍贵木材等的干燥新途径,在保证干燥质量的前提下,提高干燥速度。

1 国外柔性真空干燥技术的研究与应用进展

1.1 理论基础

真空干燥的原理可以 Clapeyron-Clausius 方程进行说明^[4],见公式(1),相关理论研究均围绕着低压、低温传热传质的过程而开展^[5]。

$$P_s = 4.1868 \frac{L}{V'' - V'} \ln T + C \quad (1)$$

式中: V'' —水蒸气比容, m^3/kg ; V' —液体水比容, m^3/kg ; L —汽化潜热, kJ/kg ; P_s —某一温度下的饱和蒸汽压, MPa ; T —绝对温度, K ; C —常量。

由公式(1)可看出,水的汽化温度随压力降低而降低,因此,在真空条件下易实现低温汽化。在 P_s 不变时,对系统加热,使愈来愈多的水分汽化,干燥速度加快;或者, T 保持不变,降低 P_s ,亦会导致更多水分汽化,从而提高干燥速度。

柔性真空干燥的理论基础与真空干燥相似,在干燥过程中,总压力梯度是主要驱动力^[6],是影响木材内部水分移动的决定性因素。若干燥温度不变,木材中的水分移动速度随气体压力的减小而急剧增大。在真空条件下,水的沸点降低,引起木材表面水分蒸发速度加快,使木材表面和内部的含水率梯度增大;木材表面水分剧烈蒸发的同时,吸收大量的汽化热,引起木材表面的冷却,使得木材表面与内部的温度梯度加大,这些因素均加速了木材内部水分向表面移动的速度。同时,真空度可以影响木材表面水分的汽化温度和蒸发速率。因此,可以通过调节真空度,控制木材柔性真空干燥的进程^[7]。

1.2 加热方式

1) 常规真空干燥 常用的 4 种加热方式^[8]:

① 热板接触加热

该加热方式的热量传递快、加热效果好、木材受热均匀;但需要较多数量、结构复杂、价格昂贵的热板,且对被干燥木材的厚度公差要求严格^[9]。

② 过热蒸汽对流连续加热

在连续真空干燥工艺中,以过热蒸汽为干燥介质。在真空条件下,随着干燥介质的密度降低,传热愈加困难,但可以通过提高气流循环速度来改善加热效果。如当压力从常压降至 20 kPa 时,气流循环速度需提高 4 倍^[9],但在实际生产中很难实现。

③ 热空气对流间歇加热

由于在真空条件下加热木材较为困难,在实际生产中常采用间歇式真空干燥工艺。当木材中残余热量提供的潜热一旦用完,即停止真空干燥,将压力恢复到常压,进行对流加热后再次进行真空干燥,如此往复。此方法虽然解决了真空中木材加热难的问题,但是干燥时间延长,操作复杂。

④ 高频加热

在高频真空干燥中,将木材放置于电极板之间,利用两个电极板之间产生的高频交变电场,使木材中的极性分子产生介质损耗而发热^[10]。该干燥方法能使木材在很短的时间内达到设定温度,例如将 50 mm 和 25 mm 厚的杉木规格材的板芯温度从 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热至 $43\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,分别仅需 2 h 和 1.2 h ^[11]。虽然该方式加热速度快,但耗电量大,干燥成本较高,设备也相对复杂。

2) 柔性真空干燥

柔性真空干燥采用直接接触加热的方式。在真空状态下,木材与柔性包装袋紧紧相贴,直接浸入温度恒定的水中进行加热。其特点是:其干燥过程受热均匀、较为缓和,且能提供一个温度稳定、易控制的干燥环境。水的比热容大,且可以循环使用,加热过程中不产生有毒气体,节能环保。

但在水浴加热过程中,由于水有浮力,需要在木材上方压一定的重物,使其完全浸入水中。考虑到传热性,通常使用金属块或混凝土块。

1.3 干燥设备

柔性真空干燥设备的结构以及主要部件,如图 1 所示。先将木材置于柔性装载装置内,通过真空接口将柔性装载装置与真空泵相连接,调节水浴箱温度,

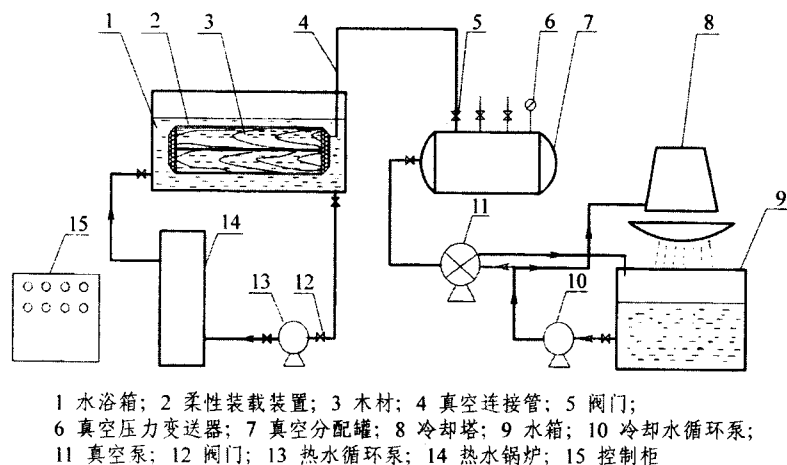


图1 木材柔性真空干燥设备结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a flexible vacuum drying equipment

再将装有木材的柔性装载装置放入水浴箱中加热进行干燥。

柔性真空干燥设备的主要部件及其功能:

- 1) 真空泵:为柔性干燥提供负压,能达到较高的真空度,绝对压力范围 1.33~101.33 kPa。
- 2) 真空分配罐:连接真空泵和柔性装载装置,并提供多个接口。
- 3) 水浴箱:调节水浴温度,并对水温进行监控。
- 4) 柔性装载装置:早期使用的是柔性管道,但是装载木材较为困难,装载量亦较少。目前已有专门设计生产的抽真空专用袋,其承重性、强度、防水性、耐热性好,且耐穿刺、耐摩擦、耐蒸煮,并装有专用防水拉链,便于木材放入和取出。

柔性装载装置是关键部件,其制作材料不尽相同,如采用 PE(聚乙烯)/PA(尼龙)/TIE(聚己二酰己二胺)/EVOH(乙烯-乙烯醇共聚物)等七层树脂组合后,利用共挤技术制成;也可使用 PVC(聚氯乙烯)/尼龙加强网/PVC 一次性压制成型。根据所用材料的材质、面积、加工难易程度,各种柔性装载装置价格不等。

目前应用较多的是 PVC/尼龙加强网/PVC 柔性装载装置,每套装置由一只长 5 m、宽 1 m、厚 0.6 mm,并带专用防水拉链的真空袋和连接件组成,一次装载容积为 0.2 m³,可重复使用,价格约 390 美元/套(折合人民币 2 500 元/套)。若今后实现国产化、批量生产,成本会大幅降低。

柔性真空干燥设备的特点:

• 40 •

1) 一次可放入多个柔性装载装置,相对独立,材堆码放灵活。

2) 对木材规格和形状无限制,可干燥大规格材(4 000 mm×100 mm×100 mm)、原木、珍贵木材和异型材等。

3) 任一装置内的木材达到要求含水率后,即可取出,不影响其他装置内木材的干燥。

4) 与一般真空干燥设备相比,柔性真空干燥系统不需要大型的真空罐,成本降低。

5) 采用的水浴加热系统较简单,且接触加热效果好;但对装置的防水性要求极高,对真空接口及真空分配罐的密闭性也有一定要求。

1.4 应用进展

红橡木为美国常见的家具用材,干燥速度缓慢,且收缩率大,易开裂及翘曲。美国弗吉尼亚理工大学于 1993 年开始进行红橡木柔性真空干燥的一系列研究^[12-16]。

当在 30℃、压力 12 mmHg 下,采用柔性真空干燥技术干燥红橡木规格材时,其平均干燥速度约 1.07%/h;当温度升高至 50℃时,其平均干燥速度可达到 2.16%/h。

并且,当红橡木含水率在纤维饱和点以上时,其干燥速度远大于含水率在纤维饱和点以下的速度。这是因为随着水分的蒸发,木材内部压力降低,总压力梯度变小。

另外,随着试材长度和厚度的增加,柔性真空干燥的速度降低。对于红橡木厚材和异型材,柔性真空干燥速度远远大于常规蒸汽干燥。真空度、干燥温度越高,红橡木试材的柔性真空干燥速度越快。

在美国,目前柔性真空干燥技术主要用于红橡木、柚木、乌木、樱桃木和核桃木等珍贵、难干木材的干燥。

例如非标准规格的红橡木家具构件,将其从生材干燥至终含水率 6%,仅需要 30 h,且干燥残余应力较小,端裂极少,无内裂现象;由于干燥温度较低,红橡木材色亦无明显变化^[12]。

2 国内柔性真空干燥技术的研究进展

2.1 研究进展

国内对柔性真空干燥理论方面的研究,还未见报道;对柔性真空干燥技术的应用研究刚则起步。如中国林科院木材工业研究所研究了难干针叶树材落叶松(*Larix gmelinii*)和难干阔叶树材马占相思(*Acacia mangium*)木材的柔性真空干燥工艺。

试验表明,对于50 mm厚的落叶松木材及马占相思木材,柔性真空干燥速度为常规干燥的8倍以上,试材开裂小,缓解了马占相思木材在常规干燥中常出现的湿心和皱缩的现象,且干燥后木材的颜色无明显变化。

2.2 问题及建议

我国在柔性真空干燥技术的研究和应用方面,尚存在以下问题:

1) 柔性真空干燥的理论研究几乎没有,大多参考真空干燥理论,但实际上柔性真空干燥的环境和条件,与一般真空干燥不尽相同,例如随着抽真空的进行,柔性装载装置会一定程度紧贴于木材表面,此时需要考虑木材与柔性薄膜之间的液气临界面和水分张力等关系,建立相应的模型来指导工艺。因此,还需充分发挥科研院校的技术力量,通过大量的试验,建立物理模型,再用数学方法描述物理过程。

建议采用目前木材干燥理论研究中常用的有限差分法和有限元法,最终建立数学模型。

2) 柔性真空干燥设备的关键构件之一为柔性装载装置,虽然其气密性和耐久性基本满足生产要求,但与刚性真空罐体相比,其使用寿命较短,循环使用次数较少,高质量的柔性装载装置仍依赖进口。

建议国内制造企业优化设计,采用标准化配件,增强设备的防水性和密闭性,批量生产,降低成本。

3) 我国柔性真空干燥技术目前尚处于应用探索阶段,没有相应的干燥基准。建议加大试验和研究力度,特别是优化针对珍贵木材、大规格材和异型材等的柔性真空干燥工艺,积累数据,为日后相关基准的制定提供依据。

3 结语

木材柔性真空干燥技术作为一种新型木材干燥技术,干燥速度快,设备简单,干燥温度低,干燥质量

好,适用于干燥大规格材、异型材、原木、珍贵木材等,具有一定的推广价值。

木材柔性真空干燥以热水作为热源,在太阳能资源丰富的地区,可利用太阳能加热水浴箱,无污染、节能环保,从而降低干燥成本;在地热资源丰富的地区,可直接利用天然热水资源,应用前景更加广阔。

参考文献:

- [1] 于洪志, 高建民. ZKY-01 型箱式木材真空干燥机及干燥工艺的试验研究[J]. 干燥技术与设备, 2007, 5(3): 121-124.
- [2] 赵寿岳, 张钟光. 我国木材真空干燥的现状与展望[C]//木材干燥学术讨论会论文集, 1999: 256.
- [3] 李贤军. 木材微波-真空干燥特性的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2005.
- [4] 徐成海, 张世伟, 关奎之. 真空干燥[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 78.
- [5] Moyne C, M Martin. Influence of a total pressure gradient in gaseous phase on drying with particular reference to wood [J]. International Heat and Mass Transfer, 1982, 25 (12): 1839-1845.
- [6] Zhang jing Chen, Fred M Lamb. Analysis of cyclic vacuum drying curve[J]. Wood Science and Technology, 2003, 31(1): 213-219.
- [7] 徐成海, 张世伟, 关奎之. 真空干燥[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 150-151.
- [8] Ressel J B. State of the art report on the vacuum drying of timber [C]. In 4th IUFRO Wood Drying Conference, 1994: 472.
- [9] Kanagawa Y, M Yasujima. Effect of heat sources on drying time in vacuum drying of wood [C]. Slovakia: Vacuum Drying of Wood'93, 1993: 292.
- [10] 张璧光. 实用木材干燥技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 204.
- [11] 高瑞清, 李晓玲. 杉木人工林木材的高频真空干燥工艺[J]. 木材工业, 2005, 19(6): 8-11.
- [12] Zhang jing Chen, Fred M. Vacuum drying of small wood components at room temperature[J]. Forest Products Journal, 2001, 51(10): 55-57.
- [13] Zhang jing Chen. Primary driving force in wood vacuum drying [D]. Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997: 104-105.
- [14] Zhang jing Chen, Fred M Lamb. A vacuum drying system for green hardwood parts[J]. Drying Technology, 2004, 22(3): 577-595.
- [15] Zhang jing Chen, Fred M Lamb. Analysis of the vacuum drying rate for red oak in a hot water vacuum drying system[J]. Drying Technology, 2007(25): 497-500.
- [16] Zhang jing Chen, Fred M Lamb. Theoretical equilibrium moisture content of wood under vacuum[J]. Wood and Fiber Science, 2002, 34(4): 553-559.

(责任编辑 张一萍、姜 征)