

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2020063

40 mm 厚杉木锯材高温干燥工艺研究

周永东, 高鑫, 周凡, 付宗营, 江京辉, 翁翔

(中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)



摘要: 对40 mm厚杉木锯材制定两个高温干燥工艺并进行试验研究, 检测和分析干燥周期、干燥速率、锯材干燥质量等指标。干燥工艺I采用高温湿空气进行干燥; 干燥工艺II在干燥前期高含水率阶段采用过热蒸汽条件, 干燥后期低含水率阶段采用高温湿空气进行干燥。结果显示: 两个干燥工艺在各阶段的干燥速率差异明显, 干燥前期工艺II的干燥速率为1.30%/h, 较工艺I低约37.2%; 但干燥后期工艺II的干燥速率为1.89%/h, 较工艺I高约70.27%。干燥工艺II可以有效避免锯材内裂的发生, 干燥质量满足GB/T 6491—2012《锯材干燥质量》二级材的指标要求, 干燥效率提高。

关键词: 杉木; 锯材; 高温干燥; 过热蒸汽

中图分类号: S782.31; S791.27; TS65 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2021) 02-0054-05

High-Temperature Drying Technology for 40 mm-Thickness Chinese Fir Lumber

ZHOU Yong-dong, GAO Xin, ZHOU Fan, FU Zong-ying, JIANG Jing-hui, WENG Xiang

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: 40 mm-thickness Chinese fir lumber was dried with two schedules of high-temperature drying (HTD) technology respectively. The medium of drying schedules was distinct: Schedule I applied high-temperature humid air in all drying processes, while schedule II applied the superheated steam (SHS) as the drying medium in the early drying stage when the moisture content (MC) of wood was high, then high-temperature humid air in the later stage when MC decreased. The drying duration, the drying rate, and the drying quality of two types of HTD schedules were measured and analyzed. The results showed that the drying rate was different at the various stages of the two drying schedules; that of Schedule II in the early stage of drying was 1.30%/h, which was 37.2% lower than Schedule I; and that of Schedule II in the latter stage of drying was 1.89%/h, being 70.27% higher than Schedule I. Under the conditions of schedule II, internal checks were effectively avoided. The drying quality of 40 mm-thickness Chinese fir lumber by Schedule II met the requirements of the 2nd grade in the national standard GB/T 6491—2012 "Lumber Drying Quality".

Key words: Chinese Fir; timber; high-temperature drying; superheated steam

收稿日期: 2020-04-14; 修改日期: 2021-01-15

基金项目: “十三五”国家重点研发计划“木材节能备料与质量控制技术研究”(2016YFD0600701)。

作者简介: 周永东 (1968—), 男, 研究员。Email: zhouyd@caf.ac.cn

杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 是我国重要的速生商品林树种之一, 在福建、湖南、江西、广西等南方地区种植广泛。第九次全国森林资源清查结果显示, 我国现有杉木人工林 990.20 万 hm^2 , 是

人工林面积最大的树种之一^[1]。杉木木材纹理通直、材色浅, 广泛应用于建筑、家具等领域。近年来实木复合门、细木工板等装饰装修产品制造中大量使用杉木作为基材。但杉木人工林木材径级小、心边材间材性差异大、尺寸稳定性差等缺点, 导致杉木制品在使用过程中易发生变形、扭曲等缺陷, 影响产品使用性能。

木材干燥直接影响其出材率、木制品使用寿命等, 在保证干燥质量的前提下提高干燥效率, 一直是研究及企业生产追求的目标。干燥工艺不同, 木材的尺寸稳定性也有差别。高温干燥时会使吸湿性较高的半纤维素降解为吸湿性较低的糠醛等物质, 因而高温处理材的吸湿性和湿胀率显著低于常规干燥材, 加工木制品的尺寸稳定性更好^[2], 且干燥效率高。但高温干燥前期, 由于木材厚度上含水率梯度高, 易导致木材表层较高的拉伸应力而造成表层较大的塑化变形; 干燥后期木材内部拉伸应力增大可能会使木材发生内裂, 使其干燥合格率降低, 极大影响木材加工的出材率。

过热蒸汽干燥具有干燥速率快、质量好、安全环保的特点, 对于柳杉、杨木等锯材干燥研究表明, 过热蒸汽干燥可在保证干燥质量的前提下, 显著提高干燥速率^[3-4]。使用过热蒸汽进行干燥预处理的研究表明, 过热蒸汽预处理可使高含水率木材的微观构造发生变化, 如纹孔破裂、纹孔膜脱落等, 木材内孔隙增加, 渗透性提高, 进而提高干燥质量及效率^[5-6]。

杉木干燥工艺已有较多研究^[7], 但厚杉木锯材干燥中内裂缺陷的发生仍较难避免, 初含水率较高时的快速干燥会更严重^[8-9]。基于高温干燥及过热蒸汽干燥的特点, 本研究对厚杉木锯材(40 mm)进行了系列干燥试验, 在高含水率阶段采用过热蒸汽、在干燥后期采用高温湿空气进行处理, 并与传统高温干燥工艺进行对比, 依国家标准检测及分析锯材干燥质量, 为提高杉木锯材的干燥质量及效率提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

杉木: 采自四川省雅安市, 树龄约40年, 胸

径26 cm, 截成长2.4 m的原木段, 原木小头直径 ≥ 16 cm。将其加工成2 400 mm $\times$ 120 mm $\times$ 40 mm锯材, 存放于-6℃冷藏库, 以保持生材的高含水率状态, 初含水率范围48.05%~206.27%。由于原木径级较小, 大部分试验锯材为包含部分心材和边材的弦切板。

1.2 试验设备

HD74/TALL型小型木材干燥试验机, 材堆尺寸为0.9 m(长) $\times$ 0.8 m(宽) $\times$ 0.8 m(高)。设备由电热锅炉产生0.6 MPa饱和蒸汽, 通过翅片管式加热器加热、喷蒸管向干燥设备内喷蒸进行加湿, 轴流风机前后有进排气口, 可与室外交换湿空气进行排湿, 与企业生产用常规干燥窑的加热、调湿方式一致。最高工作温度可达150℃, 试验过程中通过干球和湿球温度控制木材干燥工艺。轴流风机的电机可进行变频调节, 控制材堆内风速约2.0 m/s, 与企业干燥风速接近。

1.3 试验方法

在长度为2 400 mm锯材的中间及距离两端各260 mm处, 各锯取一段长度约10 mm的含水率试片, 同时将锯材加工成规格为900 mm $\times$ 120 mm $\times$ 40 mm的两段干燥试验用锯材。采用绝干法测量试片的初含水率, 取相邻的两个含水率试片的平均值为锯材的初含水率。

每次干燥试验装材数量为48块, 材堆顶部放置与锯材等长的不锈钢方材压重, 共7块, 折合单位面积压重为165 kg/m²。按照LY/T 1068—2012《锯材窑干工艺规程》规定, 在材堆中预置6块检验板, 用于检测干燥过程中含水率及干燥缺陷。

按照GB/T 6491—2012《锯材干燥质量》, 测定检验板的初含水率, 在干燥过程观察并记录检验板表面干燥缺陷的发生及发展情况、干湿球温度, 依检验板实时含水率及时调整干燥工艺阶段。

干燥工艺I: 属传统的高温干燥工艺。含水率从高到低各干燥阶段, 均采用高温湿空气条件。根据早期的高温干燥试验结果看, 预热处理后, 直接以较大干湿球温差的高温条件进行干燥, 较厚的杉木锯材容易出现内裂等缺陷^[8], 因此, 本工艺按含水率从高至低分为三个阶段, 干燥条件逐渐加强, 具体参数列于表1。

表1 40 mm厚杉木锯材高温干燥基准I
Tab.1 High-temperature drying schedule I for Chinese fir
lumber with 40 mm-thickness

含水率阶段/%	干球温度/℃	湿球温度/℃
预热处理	100	100
MC≥50	105	97
25≤MC<50	110	95
MC<25	120	90
平衡处理	95	84
终了处理 ^a	95	91

^a终了处理时间为4 h。

干燥工艺 II：在含水率≥25%的各干燥阶段，均采用过热蒸汽条件，湿球温度 100 ℃，以确保干燥介质全为蒸汽；含水率<25%之后，采用高温湿空气进行干燥，具体工艺列于表 2。在中间处理、平衡处理和终了处理阶段，干燥介质≤100 ℃，促进湿空气中的水分比较容易地被木材吸收^[10]，以快速达到平衡水分及释放干燥应力的效果。

表2 40 mm厚杉木锯材高温干燥基准II
Tab.2 High-temperature drying schedule II for Chinese
fir lumber with 40 mm-thickness

含水率阶段/%	干球温度/℃	湿球温度/℃
预热处理	100	100
MC≥100	103	100
60≤MC<100	106	100
中间处理 ^b	100	100
25≤MC<60	110	100
MC<25	120	95
平衡处理	95	84
终了处理 ^b	95	91

^b中间处理及终了处理时间均为 6 h。

在两种干燥工艺中的预热处理、平衡处理及终了处理阶段，工艺条件均依 LY/T 1068—2012 进行；干燥锯材的目标含水率范围设定为 8%~12%，因此，以 6 块检验板中含水率最低一块检验板到达 8%时开始平衡处理阶段，至含水率最高的检验板到达 12%时结束。

1.4 干燥质量检测

干燥结束后根据 GB/T 6491—2012 检测全部锯材的顺弯、横弯、翘弯、扭曲及开裂等缺陷，并检测包括 6 块检验板在内的 12 块试材的含水率、分层含水率、残余干燥应力等，检查干燥锯材的内裂情况。

2 结果与分析

2.1 常规高温干燥工艺 I 的过程及干燥质量

图 1 所示为按照工艺 I 的锯材干燥过程曲线。

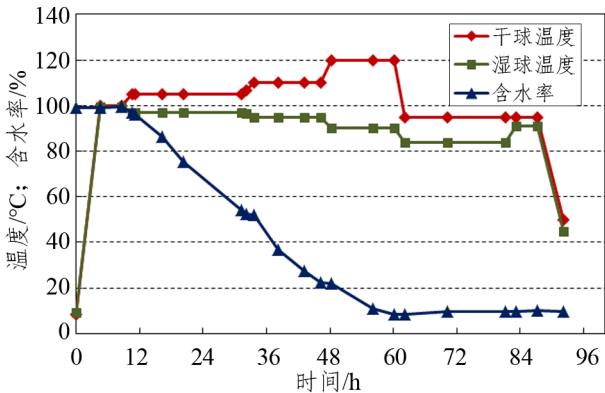


图1 40 mm厚杉木锯材高温干燥过程曲线(工艺 I)
Fig.1 High-temperature drying curve of 40 mm-thickness
Chinese fir lumber (Schedule I)

从初含水率 99.11% 干燥至终含水率为 9.58%，共耗时为 92.17 h（干燥周期约 4 d），全程平均干燥速率为 0.97%/h；由于锯材初含水率范围较大，干燥至平衡处理前含水率偏差仍较大，因此平衡处理时间长达 19 h。如不计平衡处理及终了处理时间，则全程干燥速率为 1.76%/h。从图 1 中可以看出，锯材从开始干燥至含水率 25% 期间，干燥曲线近于直线，干燥速率为 2.07%/h；干燥后期从含水率 25% 至平衡处理前，干燥速率降低为 1.11%/h。在高含水率阶段蒸发的主要是自由水，且干燥温度高于水的沸点，因此干燥速率较高；干燥后期，锯材中心层的自由水已蒸发完毕，锯材各层含水率均降至纤维饱和点以下，此时水分以扩散的方式向外侧迁移，木材内部含水率梯度、压力梯度均较前期低得多，导致后期干燥速率较低。

锯材的干燥质量检测结果，列于表 3。

从表 3 中可以看出，锯材的含水率平均值、干燥均匀度及锯材厚度上含水率偏差值，满足 GB/T 6491—2012 二级指标要求，残余干燥应力指标平均值达一级指标要求，但数据偏差较大，有近 30 % 试样的残余干燥应力值超出二级指标限值。

外观干燥质量方面，锯材的顺弯、横弯、翘弯、扭曲值，均能达到 GB/T 6491—2012 一级指标要求；但翘弯值的偏差较大，有近 35% 的试样翘弯值在 1.0%~2.0% 之间，仅达到二级指标要求。

表3 两种干燥工艺干燥后锯材干燥质量

Tab.3 Drying quality of Chinese fir lumber with different drying schedules

检测项目	工艺I	工艺II	GB/T 6491—2012 限值	
			二级	一级
平均终含水率/%	9.59	8.89	8~12	6~8
干燥均匀度/%	±2.90	±1.39	±4	±3
厚度含水率偏差/%	1.29±2.48	0.32±1.25	≤3.5	≤2.5
残余应力值/%	2.34±5.38	0.77±2.33	≤3.5	≤2.5
顺弯/%	0.15±0.08	0.12±0.05	≤2.0	≤1.0
横弯/%	0.15±0.05	0.15±0.07	≤0.5	≤0.3
翘弯/%	0.83±0.53	0.92±0.52	≤2.0	≤1.0
扭曲/%	0.01±0.04	0.23±0.33	≤2.0	≤1.0
内裂	有	无	不许有	不许有

内裂是评价锯材干燥质量的重要指标之一, 工艺I干燥的锯材有近15%发生明显内裂, 如图2a所示, 主要发生在锯材中心位置或心边材交界处。

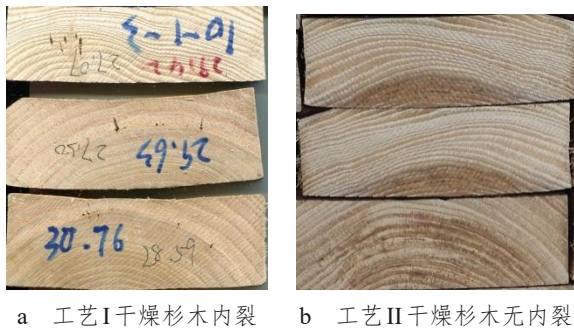


图2 杉木锯材高温干燥后内裂情况

Fig.2 Internal checks of Chinese fir lumber after high-temperature drying

木材干燥过程中水分先从木材内部迁移到表面, 再从锯材表面蒸发至干燥介质中, 水分自木材表面的蒸发速率比在木材内部移动快成百上千倍^[11], 表面水分蒸发过快则导致木材表层在干燥开始时迅速失去水分, 含水率很快降至纤维饱和点以下, 木材表层发生干缩, 而此时木材内部含水率仍很高, 尚未发生干缩, 由于存在含水率梯度, 加上温度的作用, 使得处于拉应力状态的表层失去了部分弹性形变的能力, 形成不可逆的塑性变形, 即发生了塑化变定现象^[12]。到干燥后期木材内部含水率低于纤维饱和点而发生干缩时, 由于木材表层的塑化变定限制了中心层不能充分收缩, 从而造成木材内部产生过高的拉应力, 当拉应力超过木材横纹抗拉强度时引起内裂缺陷的发生。

杉木心材的渗透性较差^[13], 水分在木材内部的移动速率较低, 干燥过程中锯材厚度上的含水率梯度更大, 导致干燥初期木材表层塑化变定严重, 干燥后期木材内部拉应力更大, 加剧了内裂发生的可能性。此外, 试验用锯材大多是心边混合材, 心材和边材间的密度及解剖构造等差异, 导致心、边材间干燥特性不同, 在心边材交界处容易产生应力集中, 因此内裂多发生于心边材交界处。

2.2 过热蒸汽-高温干燥工艺II的过程及干燥质量按工艺II的锯材干燥过程曲线如图3所示。

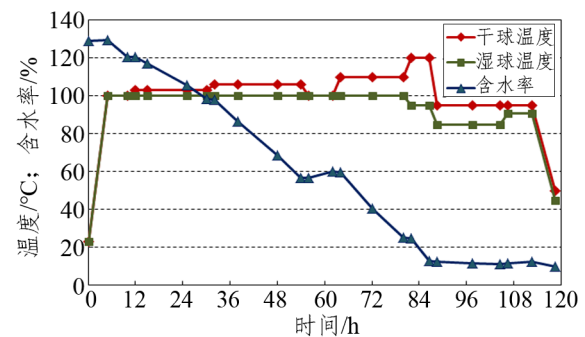


图3 40 mm厚杉木锯材干燥过程曲线(工艺II)

Fig.3 High-temperature drying curve of 40 mm-thickness Chinese fir lumber (Schedule II)

从初含水率129%干燥至终含水率9.92%, 共耗时118.5 h (干燥周期约5 d), 全程平均干燥速率为1.00%/h; 平衡处理时间为16 h, 较工艺I时间缩短, 表明干燥均匀性要好一些。如不计平衡处理及终了处理阶段, 全程干燥速率为1.43%/h, 较干燥工艺I的全程干燥速率低18.75%。

针对前期干燥过快可能导致木材表层水分蒸发过快, 而引起含水率梯度过高的问题, 工艺II在干燥前期采用过热蒸汽条件且过热度较小, 从干燥开始至含水率为25%时的干燥速率为1.30%/h, 较干燥工艺I前期的干燥速率低37.20%, 主要是干燥介质条件及干燥强度不同所致。工艺II在含水率低于25%至平衡处理前的干燥速率为1.89%/h, 比前期的干燥速率还高, 主要是因为此阶段采用高温湿空气干燥条件, 干球温度达到120℃, 干湿球温差达到了25℃, 温度升高有利于木材内部水分移动, 干湿球温差加大有利于水分从木材表面蒸发, 使干燥后期速率增加; 与工艺I相比, 工艺II在含水率低于25%阶段的干燥速率提高了70.27%, 这主要是由于前期高含水率阶段采用了过热蒸汽

条件, 会破坏部分杉木心材的闭塞纹孔, 使杉木锯材尤其是心材的渗透性得到提高^[4-6], 从而导致锯材在后期干燥速率显著提高。

从表3可以看出, 工艺II干燥杉木锯材的平均含水率满足GB/T 6491—2012二级指标要求, 干燥均匀度、厚度上含水率偏差及残余应力值, 均较工艺I的干燥质量有较大提高, 顺弯、横弯、翘弯、扭曲值等可见干燥缺陷等指标满足一级指标要求; 更为重要的是工艺II干燥后杉木锯材没有内裂缺陷发生(图2b), 主要是干燥前期采用过热蒸汽条件使杉木中部分闭塞的纹孔得到了改变或破坏, 提高了杉木锯材的渗透性, 降低了干燥过程中锯材厚度上的含水率偏差, 使干燥初期表层的塑性变定程度降低, 干燥后期木材中心的拉应力不足以超过杉木锯材的横纹抗拉强度而形成内裂。总体分析, 工艺II干燥后的40 mm厚杉木锯材的干燥质量达到GB/T 6491—2012二级指标要求。

3 结论与建议

1) 对40 mm厚杉木锯材采用设定的工艺II进行高温干燥, 相对于传统的高温湿空气为介质的高温干燥工艺I, 可显著提高锯材干燥质量, 干燥锯材无内裂缺陷发生, 锯材干燥质量满足GB/T 6491—2012二级锯材指标技术要求。

2) 两个干燥工艺间在各阶段的干燥速率差异均较明显, 干燥前期工艺II的干燥速率为1.30%/h, 较工艺I减慢37.20%; 但干燥后期工艺II的干燥速率为1.89%/h, 较工艺I提高了70.27%。采用过热蒸汽作为高温干燥前期干燥条件, 可改善杉木的干燥特性, 进而提高后期的干燥速率。本研究中为保证干燥质量, 工艺II的前期干燥基准有些保守, 干燥周期偏长, 尚有进一步优化的潜力。建议在干燥中期提高过热蒸汽的过热度, 或将中期处理阶段提前, 之后采用高温湿空气条件进行干燥, 可进一步提高干燥效率。

3) 采用过热蒸汽干燥条件, 对于干燥设备的气密性要求更高, 否则较难满足干燥工艺要求, 而且会导致干燥能耗的增加, 因此, 应保证干燥设备的保温及气密性良好。

参考文献:

- [1] 国家林业和草原局. 中国森林资源报告(2014—2018)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2019: 28-29.
- [2] 蒋佳荔, 吕建雄. 干燥处理杉木木材的干缩湿胀性质[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(6): 152-157.
JIANG J L, LYU J X. Shrinkage-swelling properties of dried Chinese fir woods[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2012, 32(6): 152-157.
- [3] 鲍咏泽, 周永东. 柳杉锯材过热蒸汽干燥与常规干燥的比较[J]. 林业科学, 2017, 53(1): 88-93.
BAO Y Z, ZHOU Y D. Comparison between superheated steam drying and conventional drying of Chinese cedar lumber[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2017, 53(1): 88-93.
- [4] 侯俊峰, 鲍咏泽, 周永东. 过热蒸汽预处理对50mm厚杨木锯材常规干燥的影响[J]. 林业科学, 2018, 54(2): 131-136.
HOU J F, BAO Y Z, ZHOU Y D. Effects of superheated steam pretreatment on conventional drying of 50 mm-thickness Poplar lumber[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 54(2): 131-136.
- [5] 鲍咏泽, 周永东. 过热蒸汽干燥对50 mm厚柳杉锯材质量及微观构造的影响[J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(4): 66-68, 73.
BAO Y Z, ZHOU Y D. Effect of superheated steam drying of 50-mm-thickness Chinese Cedar lumber on wood quality and micro-structure [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2016, 44(4): 66-68, 73.
- [6] 彭毅卿. 汽蒸预处理对杨木性质及真空干燥速率的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [7] 姬宁, 杨守禄, 黄安香, 等. 杉木木材干燥技术研究概述[J]. 贵州林业科技, 2018, 46(4): 51-57.
JI N, YANG S L, HUANG A X, et al. Overviewon research of the drying technology of Chinese fir[J]. Guizhou Forestry Science and Technology, 2018, 46(4): 51-57.
- [8] 周永东, 李晓玲. 人工林杉木高温干燥与常规干燥的比较研究[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(S1): 18-21.
ZHOU Y D, LI X L. Comparison of high-temperature drying and conventional drying of Chinese fir lumber[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2005, 27(S1): 18-21.
- [9] 涂登云, 顾炼百, 杜国兴. 高温水供热干燥速生杉木方材[J]. 木材工业, 2001, 15(5): 31-32, 34.
TU D Y, GU L B, DU G X. Drying method for Chinese Fir lumber with high temperature hot-water[J]. China Wood Industry, 2001, 15 (5): 31-32, 34.
- [10] 涂登云, 刘彬, 顾炼百. 辐射松板材降温干燥工艺的研究[J]. 华南农业大学学报, 2009, 30(4): 102-104.
TU D Y, LIU B, GU L B. Study on technology of lowering temperature drying of *Pinus radiata* board[J]. Journal of South China Agricultural University, 2009, 30(4): 102-104.
- [11] Vansteenkiste D, Stevens M, Acker J. High temperature drying of fresh sawn poplar wood in an experimental convective dryer[J]. Holz Als Roh- Und Werkstoff, 1997, 55(5): 307-314.
- [12] 李大纲, 顾炼百. 木材高温干燥过程中的弹性应变[J]. 木材工业, 2000, 14(2): 15-17.
LI D G, GU L B. Elasticity strain of wood in high temperature drying [J]. China Wood Industry, 2000, 14(2): 15-17.
- [13] 鲍甫成, 赵有科, 吕建雄. 杉木和马尾松木材渗透性与微细结构的关系研究[J]. 北京林业大学学报, 2003, 25(1): 1-5.
BAO G C, ZHAO Y K, LYU J X. Relationship between permeability and fine structure of common Chinese fir and masson pine wood[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2003, 25(1): 1-5.

(本文编校 张 鹏、向 琴)