

黑木相思木材干燥特性及干燥工艺制定

周凡¹, 周永东¹, 高鑫¹, 付宗营¹, 侯俊峰¹, 翁翔¹, 林韶辉²

(1. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091; 2. 韶关市国有河口林场, 广东 韶关 512532)

摘要: 【目的】为获得黑木相思 *Acacia melanoxylon* 木材的干燥特性, 编制合理干燥基准, 从而促进其实际开发和利用。【方法】采用百度试验法研究黑木相思木材的干燥特性, 参照百度试验干燥缺陷等级拟定木材干燥初终期条件, 依据锯材干燥质量检测结果对黑木相思锯材常规干燥工艺进行系统优化试验, 并制定 25 mm 厚黑木相思锯材的干燥基准。【结果】黑木相思木材的干燥缺陷主要为初期开裂和扭曲变形, 其次为截面变形, 无内裂产生。从干燥速度看, 黑木相思属于中等易干材。木材含水率 15% 时的气干密度为 $0.619 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 属于中等范畴。采用优化制定的干燥基准对 25 mm 厚黑木相思锯材进行常规干燥后, 木材含水率从 110.40% 干至 8.42%, 干燥周期为 268.0 h (11.2 d), 整个干燥过程中干燥速率比较稳定, 平均为 $0.38\% \cdot \text{h}^{-1}$ 。【结论】黑木相思干燥锯材的平均最终含水率、干燥均匀度、厚度上含水率偏差、残余应力以及可见干燥缺陷方面的指标均达到锯材干燥质量二级要求。本研究制定的黑木相思锯材干燥工艺可为实际干燥生产过程提供科学依据。图 2 表 6 参 25

关键词: 木材学; 百度试验法; 干燥特性; 干燥基准; 干燥质量; 黑木相思

中图分类号: S723.7 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2020)03-0001-07

Drying characteristics and drying schedule developed of *Acacia melanoxylon* wood

ZHOU Fan¹, ZHOU Yongdong¹, GAO Xin¹, FU Zongying¹, HOU Junfeng¹, WENG Xiang¹, LIN Shaohui²

(1. Research Institution of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. State Hekou Forest Farm of Shaoguan, Shaoguan 512532, Guangdong, China)

Abstract: [Objective] In order to provide the technical support for promoting the practical development and utilization of blackwood (*Acacia melanoxylon*) planted in China, its drying characteristics were investigated, and further its suitable drying schedule was drawn up. [Method] The drying characteristics of blackwood were determined using the 100 °C test method. The kiln drying experiments were conducted on the lumber of 25 mm in thickness to develop a suitable drying technique. [Result] The main drying defects were initial cracking and twist deformation. The cross-sectional deformation degree was light, and there were no internal cracks. The blackwood was moderately easy to dry with the drying speed. The blackwood was a medium density hardwood with the air-dry density at 15% moisture content of $0.619 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Applying the proposed drying technique, the drying period of lumber was 268.0 h (11.2 d) as the moisture content of wood decreased from 110.40% to 8.42%. The drying rate remained relatively constant with an average value of $0.38\% \cdot \text{h}^{-1}$ during the whole process. [Conclusion] The findings provide the scientific basis for the actual production of kiln drying to ensure drying quality of the blackwood. [Ch, 2 fig. 6 tab. 25 ref.]

Key words: wood science; 100 °C test; drying characteristics; drying schedule; drying quality; *Acacia melanoxylon*

收稿日期: 2019-07-02; 修回日期: 2019-11-20

基金项目: 中央级公益性科研院所基金项目 (CAFYBB2018ZB004)

作者简介: 周凡, 助理研究员, 博士, 从事木材物理与干燥研究。E-mail: zhoufanzju@163.com。通信作者: 周永东, 研究员, 博士, 从事木材干燥研究。E-mail: zhouyd@caf.ac.cn

黑木相思 *Acacia melanoxylon* 为含羞草科 Mimosaceae 金合欢属 *Acacia* 树种, 原产澳大利亚东南部及塔斯马尼亚等地区, 后被许多国家和地区先后引种成功。由于生态效益好, 生长适应性强, 速生性强, 材质好, 经济价值高^[1-7], 20世纪90年代黑木相思作为优材、改土树种引入中国, 在广东、广西、福建、海南等地大量推广种植^[6], 是中国南方引种的主要用材树种之一。随着市场需求的增大, 近年来黑木相思种植面积还在逐渐扩大^[2]。据不完全统计, 2015年起, 黑木相思无性系的造林面积正以超过 $666.7 \text{ hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 的速度发展^[7], 其推广栽培及资源发展前景巨大。目前国内有关黑木相思的研究主要集中在引种栽培、苗木选育、生长特性等方面, 有关实木加工应用方面的研究尚且缺乏。木材干燥是合理高效利用木材的重要前提, 是木材加工行业生产过程不可缺少的重要工序^[8-9]。百度试验法是常用的制定木材干燥基准的方法, 使用材料少, 操作简便, 可用于新材种干燥基准的快速拟定^[10-12] 和不同类型材种木材干燥特性的快速比较^[13]。本研究针对中国人工种植的黑木相思木材, 利用百度试验法研究其基础干燥特性, 采用实验室干燥设备探索并优化锯材的干燥工艺, 以期编制适合 25 mm 厚黑木相思锯材的常规干燥工艺基准, 为黑木相思木材的实际开发和利用提供技术支撑。

1 材料和方法

1.1 试验材料

黑木相思木材采集自广东省韶关市国有河口林场。百度试验用试样, 选择无缺陷的弦切板生材, 于板材中间部位取材, 两端面是新锯开截面, 四面刨光, 尺寸为 $200 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 试件数量 12 块, 初含水率为 $(109.31 \pm 6.16)\%$ 。干燥工艺试验用锯材用生材直接加工成尺寸为 $900 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 的板材, 初含水率为 $(97.76 \pm 17.04)\%$ 。

1.2 试验方法

1.2.1 百度试验法 百度试验法参照文献 [13]。试件加工完毕立即标明测量点位置, 测量尺寸 (0.01 mm) 和质量 (0.01 g)。为使试件受热和通风均匀, 将其沿纹理方向水平竖立放置于鼓风干燥箱中, 在 $(100 \pm 2)^\circ\text{C}$ 条件下干燥。干燥过程定时取出称量并记录初期开裂 (端裂、端表裂、表裂、贯通裂) 的出现及发展情况。干燥初期每隔 1~2 h 观测 1 次, 当裂纹发展到最大时, 记录试件初期开裂情况; 当裂纹开始愈合时, 观测间隔延长至 4~8 h 或更长。每次观测同时称量, 待 2 次测量基本相同时认为试件达到绝干, 停止干燥。待试件冷却后取出平放在平板上, 使其 3 个角着板, 量其另一角偏离平板的高度作为扭曲变形值。在原标记的各测点测量试件的尺寸, 计算干缩特性。试样称量后作为试样最终质量, 后在其中心位置沿长度方向截取 15.00 mm 试片, 用烘干法测定其含水率作为试件的最终含水率, 计算试件绝干质量, 从而推算干燥过程中试件含水率变化。同时检查新截断面的内裂情况, 测量侧边厚度与邻边下凹处厚度差为截面变形值。

1.2.2 干燥工艺 采用 HD 74/TA II 型小型木材干燥试验机通过翅片管式加热器加热 (0.6 MPa 蒸汽, 125°C), 喷蒸管喷蒸加湿; 通过变频器调节控制材堆内风速, 风速范围为 $0.5 \sim 5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。干燥机的加热、加湿方式与企业生产用的常规干燥设备一致; 通风方式与顶风机型干燥设备一致。干燥工艺试验每次装材 48 块, 材堆尺寸 $900 \text{ mm} \times 800 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$, 材堆顶部放置不锈钢压重, 单位面积压重为 $248 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 风速为 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 与企业干燥生产用风速接近。干燥过程通过干燥试验机控制系统进行, 按预设干燥基准自动控制干燥机内干湿球温度, 当含水率达到当前干燥阶段含水率终点时, 控制进入下一阶段的干燥工艺过程。按照 LY/T1068—2012《锯材窑干工艺规程》规定, 选择 6 块检验板, 定时取出称量, 推算干燥过程中含水率, 并记录干燥缺陷变化情况。依照 GB/T 6491-2012《锯材干燥质量》, 检测全部干燥锯材的可见干燥缺陷, 对 6 块检验板和从材堆中随机抽取的 6 块锯材一起检测最终含水率、分层含水率、干燥残余应力等指标。

2 结果与分析

2.1 木材干燥特性

统计黑木相思木材百度试验干燥缺陷和干燥时间, 依据百度试验法的分级标准^[14] 评定试件的干燥特性等级, 具体结果见表 1。

表 1 黑木相思木材百度试验干燥特性及等级

Table 1 Grades of drying defects and drying time in 100 °C test for *A. melanoxylon* wood

试件编号	截面变形/mm	扭曲值/mm	内裂	干燥时间/h	初期开裂
1	0.40 (1)	0.5 (1)	无(1)	16.2 (3)	短细端表裂1条(2)
2	0.54 (2)	0.5 (1)	无(1)	17.3 (3)	短细端表裂1条(2)
3	0.69 (2)	1.3 (2)	无(1)	17.5 (3)	短细端表裂1条(2)
4	0.51 (2)	1.2 (2)	无(1)	17.7 (3)	短细端表裂1条, 长细贯通裂1条(4)
5	0.86 (2)	4.0 (3)	无(1)	19.3 (3)	短细端表裂3条(2)
6	0.57 (2)	3.9 (3)	无(1)	19.9 (3)	短细端表裂1条(2)
7	0.58 (2)	3.7 (3)	无(1)	19.0 (3)	短细端表裂1条(2)
8	0.47 (1)	3.5 (3)	无(1)	17.8 (3)	短细端表裂1条, 短细贯通裂1条(4)
9	0.18 (1)	3.5 (3)	无(1)	17.2 (3)	短细端表裂1条(2)
10	0.49 (1)	3.9 (3)	无(1)	18.3 (3)	短细端表裂1条(2)
11	0.54 (2)	0.8 (2)	无(1)	17.7 (3)	短细端表裂3条(2)
12	0.33 (1)	0.4 (1)	无(1)	15.8 (3)	短细端表裂5条(2)

说明: 括号内数值为百度试验法的干燥特性等级

2.1.1 初期开裂 试件初含水率高, 干燥 1 h 时, 25.00% 试件的端面出现细微裂纹; 干燥 2 h, 所有试件端面均出现细微裂纹, 16.67% 试件开始出现端表裂, 有 2 块试件各产生 1 条贯通性裂纹; 干燥 3 h 时, 66.67% 试件出现端表裂。随着干燥时间延长, 试件含水率继续降低, 试件裂纹长度及宽度继续发展, 裂纹数量增多。干燥 7 h 时, 裂纹集中出现, 此时试件平均含水率约为 55.00%, 之后初期开裂缓慢发展并趋于稳定, 干燥 14 h 初期开裂达到最大值, 此时试件平均含水率约为 33.00%。高温低湿环境下, 高初含水率的试件迅速排出表层水分, 表面与内部含水率梯度过大, 表层受到的拉应力超出木材的抗拉强度, 形成初期开裂^[12]。随着干燥继续进行, 木材内部开始收缩, 应力反转, 产生了内拉外压的应力分布, 木材初期开裂逐渐闭合^[12, 15]。干燥约 35 h, 所有初期裂纹基本愈合。观察发现: 黑木相思木材初期开裂主要为端裂和端表裂, 且所有端裂和端表裂愈合前宽度最大值小于 1.00 mm, 长度最大值小于 5.00 cm。按照百度试验分级标准, 试件初期开裂等级为 2~4 级, 其中 2 级占 83.33%, 4 级占 16.67%; 以最低干燥缺陷原则考虑初期开裂等级为 4 级。初期开裂形成的主要原因是干燥初期的干湿球温度差过大、温度过高。因此在制定干燥基准时, 干燥初期的干湿球温度差及温度不宜设定太高, 有利于控制干燥速度, 避免开裂, 保证干燥质量。

2.1.2 内部开裂 一般来说, 内裂是一种较严重的干燥缺陷。观察发现: 试件干燥后期含水率变化平缓, 木材内水分排除较为均匀, 木材内部收缩均匀, 因此实验中所有试件均未产生内部开裂, 判定内裂等级均为 1 级。

2.1.3 截面变形 试件的截面变形值为 0.18~0.86 mm, 根据百度试验法的分级标准判定变形等级为 1~2 级, 其中 1 级占 33.33%, 2 级占 66.67%; 综合考虑截面变形等级为 2 级。截面变形由干燥过程中木材表层与内层水分差异及表层硬化引起^[16-18]。黑木相思材质较均匀, 木材表层及内层收缩差异不大, 因此截面变形程度较轻。截面变形反映木材的塑性特征, 主要是外层的残余变形, 是干燥终了时木材中残余应力的根源。产生截面变形的主要原因是干燥初期温度过高、湿度过低^[12]。干燥过程中可通过降低干燥初期温度、增加湿度来减少截面变形。

2.1.4 扭曲变形 试件的扭曲变形值为 0.40~4.00 mm, 变形等级为 1~3 级, 其中 1 级占 25.00%, 2 级占 25.00%, 3 级占 50.00%; 综合考虑扭曲变形等级为 3 级。试件干燥过程中出现的比较明显的扭曲变形, 可能是由板材纹理不通直等导致板材各部位的干缩差异引起^[14, 19]。干燥过程中可通过终了处理或以机械抑制的方法在材堆顶部压重物减小扭曲变形^[10]。

2.1.5 干缩特性 木材干缩特性可反映木材的开裂和变形情况。由百度试验法测定的干缩特性(以干缩时含水率 30% 计算)可知(表 2): 试件的平均弦向干缩率为 5.06%, 平均径向干缩率 2.95%, 弦向和径向的差异干缩值为 1.75。差异干缩反映木材干燥过程中是否容易翘曲和开裂^[11]。根据材性分级标准^[19], 黑

木相思的差异干缩属“小”。试件的平均弦向干缩系数为0.169%，径向干缩系数为0.098%，体积干缩系数为0.281%，体积干缩系数属“很小”。干缩特性结果表明：黑木相思木材在干燥时产生翘曲和开裂的趋势相对较小^[20]。由表2所示：试件基本密度、气干密度(含水率15%)和绝干密度均值分别为 $0.518 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $0.620 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $0.562 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ；黑木相思气干密度介于 $0.551\sim 0.750 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 范围，根据木材密度的5个品质划分级别^[20]，属于中等级别。

表2 百度试验测定黑木相思木材干缩特性和密度

Table 2 Shrinkage characteristics and densities of *A. melanoxylon* wood by 100 °C test

指标	干缩系数/%				干缩率/%				密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)		
	纵向	弦向	径向	体积	纵向	弦向	径向	体积	基本	气干	绝干
均值	0.009	0.169	0.098	0.281	0.26	5.06	2.95	8.44	0.518	0.620	0.562
标准差	0.006	0.017	0.019	0.033	0.17	0.51	0.58	1.00	0.037	0.043	0.039

说明：气干密度为含水率15%时的指标

2.1.6 干燥速度 百度试验过程中试件含水率变化见图1。试件从平均初含水率109.31%干至30.00%，平均用时约14.7 h，干燥速率为 $5.40\%\cdot\text{h}^{-1}$ ；从含水率30.00%干至5.00%时，平均用时约16.4 h，干燥速率为 $1.52\%\cdot\text{h}^{-1}$ 。干燥后期试件干燥速率小于干燥前期，用时约67.2 h，此后试件平均干燥速率近乎为零。在剧烈的外部干燥环境中，干燥速率取决于可供蒸发的水分量以及水分在木材内部移动的难易程度^[13]。干燥前期主要是木材中的自由水在毛细管张力作用下，由内部迅速移动至表层蒸发；干燥中、后期，干燥由木材中吸着水蒸发造成，水蒸发所需动力增大，干燥速率降低^[21]。在保证干燥质量的基础上，干燥过程应逐步提高干湿球温差，可提高排除吸着水的能量^[22]。干燥速度表征木材内部水分向外流动的快慢，反映了木材干燥的难易程度，与木材的材质和构造有关。

2.2 拟定木材干燥条件

参照百度试验法干燥缺陷等级对应干燥条件的分级标准^[14]，获得的黑木相思木材干燥的初终期干燥条件如表3所示。从所列干燥条件中选出最低值为干燥基准的基本条件，即初期温度 $50.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，初期干湿球温差 $2\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，末期温度 $80.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。参考阔叶材密度与干燥条件的关系^[23-25]，计算黑木相思木材适用的干燥基准编号为7-4-3或T7-D3(温度编号= $13.7-13.6\times 0.518=6.66\approx 7$ ；含水率编号= $4.51-1.56\times 0.518=3.70\approx 4$ ，干湿球温差编号= $5.20-3.95\times 0.518=3.15\approx 3$)，具体为干燥初期温度 $54.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，干湿球温差 $2.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，末期温度 $71.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由干燥特性可知：黑木相思初期开裂等级相对较高，截面变形及内裂等级相对较小，因而对其进行干燥时，前期干湿球温差不宜过大，升温不宜过快，以免出现初期开裂；中后期各阶段升温幅度及干湿球温度差可适当加大，以提高干燥效率。综上，拟定黑木相思板材干燥的初期温度为 $55.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，初期干湿球温差为 $3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，末期温度为 $80.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

根据拟定的木材干燥初终期条件，参照国家林业行业标准LY/T 1068-2012《锯材窑干工艺规程》中阔叶材干燥基准的一般编制原则，初步拟定黑木相思锯材的干燥基准(表4)。干燥初期干湿球温差 $3\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，当含水率降至30%后，含水率每降低5%，干球温度升高 $5\sim 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，干湿球温差增加1.2~1.6倍，整个干燥过程干湿球温差最大约 $20\sim 28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

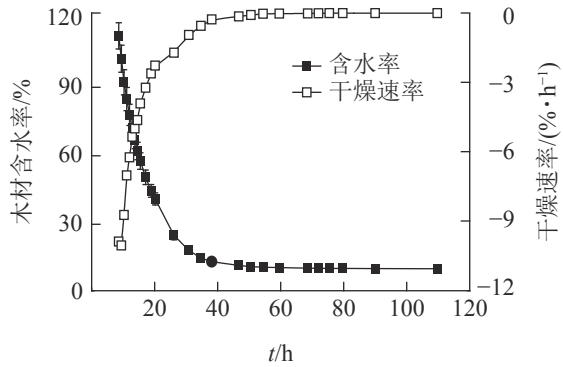


图1 百度试验中黑木相思木材含水率的变化
Figure 1 Change of moisture content in 100 °C test for *A. melanoxylon*

在保证干燥质量的基础上，干燥过程应逐步提高干湿球温差，可提高排除吸着水的能量^[22]。干燥速度表征木材内部水分向外流动的快慢，反映了木材干燥的难易程度，与木材的材质和构造有关。

表3 百度试验测定黑木相思木材干燥条件

Table 3 Drying conditions corresponding to defects grades in 100 °C test for *A. melanoxylon* wood

干燥缺陷	干燥缺陷等级	$T/^{\circ}\text{C}$		
		初期	初期干湿球温差	末期
初期开裂	3	50.0	2~3	80.0
截面变形	2	70.0	4~7	90.0
内裂	1	80.0	5~7	95.0

表 4 拟定的黑木相思锯材干燥基准

含水率/%	$T_{\text{干球}}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{湿球}}/^{\circ}\text{C}$	备注	含水率/%	$T_{\text{干球}}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{湿球}}/^{\circ}\text{C}$	备注
预热	60.0	59.5	4.0 h 升温 4.0 h 保温	25~20	70.0	58.0	
>50	55.0	52.0		20~15	75.0	60.0	
50~40	57.0	53.0		<15	80.0	58.0	
40~30	60.0	55.0		8	85.0	74.0	平衡处理
30	70.0	68.0	中间处理 5.0 h	12	85.0	81.0	终了平衡 4.0 h
30~25	65.0	57.0		降温	50.0	45.0	降温 5.0 h

2.3 干燥工艺试验

2.3.1 干燥基准优化 根据拟定的干燥基准，用小型木材干燥试验机对 25 mm 厚黑木相思木材进行系统试验。干燥质量检测结果表明锯材最终含水率为 6.88%，残余应力值 (2.94 ± 1.92)%，其余指标均满足锯材干燥质量的二级指标要求。根据锯材终含水率较低而残余应力较大的情况，对拟定的干燥基准进行调整，最终得到优化的 25 mm 厚黑木相思锯材干燥基准 (表 5)。依照 GB/T 6491—2012《锯材干燥质量》对于二级干燥材的要求设定平衡处理条件，在检验板含水率最低值为 8% 时开始，至检验板含水率最高值 12% 时结束。干燥末期的平衡处理和终了处理的最高温度高于 80.0 °C，有利于锯材中水分的移动及残余应力的释放。

表 5 优化的 25 mm 厚黑木相思锯材干燥基准

含水率/%	$T_{\text{干球}}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{湿球}}/^{\circ}\text{C}$	备注	含水率/%	$T_{\text{干球}}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{湿球}}/^{\circ}\text{C}$	备注
升温预热	60.0	59.5	4.0 h 升温 4.0 h 保温	20~15	75.0	60.0	
>60	55.0	52.0		<15	80.0	58.0	
60~30	60.0	55.0		8	85.0	76.0	平衡处理
30	70.0	68.0	中间处理 5.0 h	12	85.0	81.0	终了平衡 4.0 h
30~25	65.0	57.0		降温	50.0	45.0	降温 5.0 h
25~20	70.0	58.0					

2.3.2 锯材干燥曲线 采用优化的干燥基准进行干燥实验，根据 6 块检验板在干燥过程中的平均含水率变化情况，得到 25 mm 厚黑木相思锯材的干燥过程曲线 (图 2)。锯材由平均初含水率 110.40% 干燥至终含水率 8.42%，平均干燥速率约为 $0.38\% \cdot \text{h}^{-1}$ ，整个干燥过程共耗时 268.0 h，即干燥周期为 11.2 d。整个干燥过程中干燥速率比较稳定，表明干燥过程中温度条件的设定比较合理。

2.3.3 锯材干燥质量 由表 6 可知：采用优化干燥基准进行干燥，锯材的平均最终含水率为 8.31%，满足锯材干燥质量的二级指标要求。锯材的干燥均匀度、厚度上含水率偏差、残余应力以及可见干燥缺陷方面的指标均可满足锯材干燥质量的一级指标。综合评价，根据优化的干燥基准进行 25 mm 厚黑木相思锯材干燥，可获得满足二级干燥质量指标的干燥锯材，适用于家具、建筑门窗、实木地板、细工木板、室内装饰、文体用品等实木制品的生产。

3 结论

百度试干燥法表明：黑木相思木材干燥缺陷初期开裂和扭曲变形等级相对较高，分别为 4 级和

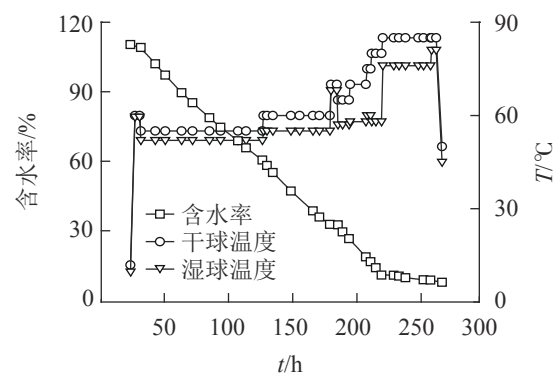


图 2 25 mm 厚黑木相思锯材干燥过程曲线
Figure 2 Drying curve for 25 mm-thickness *A. melanoxylon* lumber

表6 优化后25 mm厚黑木相思锯材干燥质量

Table 6 Drying qualities of 25 mm-thickness *A. melanoxylon* lumber

项目	最终含水率/%	干燥均匀度/%	厚度上含水率偏差/%	残余应力值/%	皱缩深度/mm
检测值	8.31	±0.60	0.22±0.55	0.84±0.83	无
二级	8.0~12.0	±4.0	3.5	<3.5	不许有
一级	6.0~8.0	±3.0	2.5	<2.5	不许有

项目	弯曲/%				开裂/%	
	顺弯	横弯	翘弯	扭曲	内裂	纵裂
检测值	0.15±0.18	0.27±0.16	0.56±0.35	0.24±0.24	无	无
二级	2.0	1.0	4.0	2.0	不许有	6.0
一级	1.0	0.5	2.0	1.0	不许有	4.0

3级；截面变形及内裂等级较小，分别为2级和1级；干燥速度中等，为3级。为避免初期开裂，干燥前期干湿球温差不宜过大，升温不宜过快，中后期干湿球温差和升温可适当加大，提高干燥效率。

对黑木相思锯材进行干燥工艺优化试验，得到优化的25 mm厚黑木相思锯材干燥基准，干燥初期温度55.0℃，初期干湿球温度差3.0℃，末期温度80.0℃。以干燥锯材的平均最终含水率、干燥均匀度、厚度上含水率偏差、残余应力、可见干燥缺陷等指标综合评价，干燥锯材的质量达到GB/T6491—2012《锯材干燥质量》中锯材干燥质量二级指标。实际干燥生产还需依干燥设备及装材量等对干燥工艺进行调整和优化，在满足实际生产需求的前提下，提高干燥质量及效率，降低生产成本。

4 参考文献

- [1] HUSSAIN M I, GONZÁLEZ L, REIGOSA M J. Allelopathic potential of *Acacia melanoxylon* on the germination and root growth of native species [J]. *Weed Biol Manage*, 2011, **11**(1): 18 – 28.
- [2] 窦雅静, 陆俊镔, 康丽华, 等. 黑木相思根瘤菌遗传多样性[J]. *微生物学报*, 2012, **52**(12): 1439 – 1448.
DOU Yajing, LU Junkun, KANG Lihua, et al. Biodiversity of Rhizobia associated with *Acacia melanoxylon* grown in South China [J]. *Acta Microbiol Sin*, 2012, **52**(12): 1439 – 1448.
- [3] BRADBURY G J, POTTS B M, BEADLE C L. Genetic and environmental variation in wood properties of *Acacia melanoxylon* [J]. *Ann For Sci*, 2011, **68**(8): 1363 – 1373.
- [4] MACHADO J S, LOUZADA J L, SANTOS A J A, et al. Variation of wood density and mechanical properties of blackwood (*Acacia melanoxylon* R. Br.) [J]. *Mater Design*, 2014, **56**: 975 – 980.
- [5] TAVARES F, LOUZADA J L, PEREIRA H. Variation in wood density and ring width in *Acacia melanoxylon* at four sites in Portugal [J]. *Eur J For Res*, 2014, **133**(1): 31 – 39.
- [6] 何斌, 刘红英, 余春和, 等. 黑木相思人工林生态系统生物量、碳贮量及其分配特征[J]. *东北林业大学学报*, 2012, **40**(3): 48 – 50.
HE Bin, LIU Hongying, YU Chunhe, et al. Vertical distribution of biomass and carbon storage in *Acacia melanoxylon* plantation ecosystem [J]. *J Northeast For Univ*, 2012, **40**(3): 48 – 50.
- [7] 裘珍飞. 黑木相思优良无性系叶片数量性状与生长评价[J]. *热带亚热带植物学报*, 2017, **25**(5): 465 – 471.
QIU Zhenfei. Leaf quantitative traits and growth evaluation in *Acacia melanoxylon* excellent clones [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2017, **25**(5): 465 – 471.
- [8] CAROLINA T, CYNTHIA S, RÓGER M. Kiln drying behavior utilizing drying rate of lumber from six fast-growth plantation species in Costa Rica [J]. *Dry Technol*, 2016, **34**(4): 443 – 453.
- [9] HE Zhengbin, ZHANG Yu, WANG Zhenyu, et al. Reducing wood drying time by application of ultrasound pretreatment [J]. *Dry Technol*, 2016, **34**(10): 1141 – 1146.
- [10] 陈凤义, 孙照斌, 申立乾, 等. 美国黑胡桃木干燥性质研究及干燥基准拟定[J]. *林业科技开发*, 2015, **29**(4): 99 – 102.
CHEN Fengyi, SUN Zhaobin, SHEN Liqian, et al. Study on drying characteristics and drying schedule of black walnut

- wood [J]. *China For Technol*, 2015, **29**(4): 99 – 102.
- [11] 刘媛, 卢翠香, 黄腾华, 等. 桉树无性系大径材干燥特性分析[J]. *南方农业学报*, 2017, **48**(5): 896 – 900.
LIU Yuan, LU Cuixiang, HUANG Tenghua, *et al.* Drying characteristics of *Eucalyptus* clones with large-diameter [J]. *J Southern Agri*, 2017, **48**(5): 896 – 900.
- [12] 张新宇, 孙照斌, 李星, 等. 银腺杨木材干燥特性初步研究[J]. *林业机械与木工设备*, 2017, **45**(9): 31 – 34.
ZHANG Xinyu, SUN Zhaobin, LI Xing, *et al.* Preliminarily study on the drying characteristic of *Populus alba* × *P. glandulosa* [J]. *For Mach Woodwork Equip*, 2017, **45**(9): 31 – 34.
- [13] 罗朋朋, 陈太安, 胡志坚, 等. 9 种西南乡土杨树干燥特性比较[J]. *西南林业大学学报*, 2016, **36**(1): 126 – 130.
LUO Pengpeng, CHEN Tai'an, HU Zhijian, *et al.* Comparison of drying characteristics of nine native poplars from southwestern China [J]. *J Southwest For Univ*, 2016, **36**(1): 126 – 130.
- [14] 戴于龙, 黄月瑞, 刘渝, 等. 推广预测木材干燥基准的百度试验法的可行性探讨[J]. *北京林学院学报*, 1985(1): 19 – 29.
DAI Yulong, HUANG Yuerui, LIU Yu, *et al.* Feasibility of a new method for determination for kiln-drying schedule of wood [J]. *J Beijing For Coll*, 1985(1): 19 – 29.
- [15] 赵庚, 陈广元. 菲律宾产娑罗双木材(菲律宾桃花心木)干燥特性分析[J]. *木材工业*, 2015, **29**(1): 46 – 48.
ZHAO Geng, CHEN Guangyuan. Drying characteristics of *Shorea* spp. wood [J]. *China Wood Ind*, 2015, **29**(1): 46 – 48.
- [16] 李延军, 马掌法, 张宏, 等. 狄氏黄胆木干燥工艺的初步研究[J]. *浙江林学院学报*, 2001, **18**(4): 384 – 388.
LI Yanjun, MA Zhangfa, ZHANG Hong, *et al.* Preliminary study on the drying technology of *Nauclea diderrichii* [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2001, **18**(4): 384 – 388.
- [17] 龙传文. 粗皮桉木材的干燥特性与干燥基准制定[J]. *中南林业科技大学学报*, 2012, **32**(1): 48 – 50.
LONG Chuanwen. Drying characteristics and drying schedule establishment of *Eucalyptus pellita* wood [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2012, **32**(1): 48 – 50.
- [18] 裴珊珊, 胡进波, 刘元, 等. 人工林红锥木材干燥特性初探[J]. *木材工业*, 2005, **19**(6): 19 – 20.
CHANG Shanshan, HU Jinbo, LIU Yuan, *et al.* Drying characteristics of plantation grown *Castanopsis hystrix* [J]. *China Wood Ind*, 2005, **19**(6): 19 – 20.
- [19] 李娜, 何定华, 滕通濂. 五种福建阔叶树材的干燥特性[J]. *木材工业*, 1993, **7**(1): 30 – 33.
LI Na, HE Dinghua, TENG Tonglian. The drying characteristics of five hardwood species from Fujian Province [J]. *China Wood Ind*, 1993, **7**(1): 30 – 33.
- [20] 成俊卿. 木材学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1985: 435–481.
- [21] 符韵林, 邱炳发, 韦鹏练, 等. 观光木木材干燥特性研究[J]. *浙江农林大学学报*, 2011, **28**(5): 767 – 770.
FU Yunlin, QIU Bingfa, WEI Penglian, *et al.* Drying characteristics of *Tsoongiodendron odorum* wood [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2011, **28**(5): 767 – 770.
- [22] 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 Yongze, ZHOU Yongdong. Comparison between superheated steam drying and conventional drying of Chinese cedar lumber [J]. *Sci Silv Sin*, 2017, **53**(1): 88 – 93.
- [23] 彭冲, 张振伟, 夏朝彦, 等. 浸渍毛白杨锯材的干燥工艺[J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2015, **44**(3): 329 – 332.
PENG Chong, ZHANG Zhenwei, XIA Chaoyan, *et al.* Optimized drying process for resin impregnated *Aspen* wood [J]. *J Fujian Agric For Univ Nat Sci Ed*, 2015, **44**(3): 329 – 332.
- [24] SIMPSON W T, VERRILL S P. Estimating kiln schedules for tropical and temperate hardwoods using specific gravity [J]. *For Prod J*, 1997, **47**(7/8): 64 – 68.
- [25] SIMPSON W T. *Dry Kiln Operator's Manual*[M]. Madison: U. S. Department of Agriculture, 1991: 148–150.