

研究与开发

热处理对毛白杨木材物理力学性能的影响

黄荣凤, 吕建雄, 曹永建

(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: 采用蒸汽介质, 氧气含量控制在2%以下, 在热处理箱内对毛白杨木材进行热处理, 研究处理温度(170~230℃)和处理时间(时间1~5 h)对毛白杨木材物理力学性能的影响。结果表明, 随着处理温度的提高和处理时间的延长, 毛白杨木材的抗胀缩率显著提高, 但抗弯强度显著降低; 热处理后毛白杨木材的抗弯弹性模量提高。

关键词: 热处理; 毛白杨; 尺寸稳定性; 抗弯强度; 抗弯弹性模量; 硬度

中图分类号: S781.3; S792.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8654(2010)04-0005-04

Effect of Heat Treatment on Properties of Chinese White Poplar

HUANG Rong-feng, LU Jian-xiong, CAO Yong-jian

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

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

Abstract: Chinese white poplar (*Populus tomentosa* Carr.) specimens were treated under a heat and steam chamber with oxygen content less than 2 percent. The effects of temperature (170~230℃) and time (1~5 hours) were investigated on selected physical and mechanical properties of the specimens. The results showed that increasing both the temperature and time, both dimensional stability and modulus of elasticity were improved, but the modulus of rupture decreased.

Key words: heat-treatment; *Populus tomentosa* Carr.; dimensional stability; modulus of rupture; modulus of elasticity; hardness

高温热处理能够使木材的吸水性显著降低, 从而提高其尺寸稳定性; 同时, 由于木材纤维素和半纤维素发生降解, 导致木材的机械强度降低, 脆性增加^[1]。不同树种的木材, 因其结构及主要组分的化学成分含量存在差异, 即使热处理条件完全相同, 热处理效果不尽相同。对10个树种木材热处理后的性能研究发现, 热处理后不同树种木材间的平衡含水率差别甚微, 但力学性能差异明显, 多数树种的木材热处理后抗弯强度降低, 近半树种木材热处理后的抗弯弹性模量增加^[2]。因此, 为了科学、合理地利用高温热处理

的改性效果, 必须把握各种木材的物理力学性能随处理温度和处理时间的变化规律, 在不降低木材力学性能的情况下, 最大限度地提高木材的耐久性和尺寸稳定性。

毛白杨是我国主要人工林树种, 其木材材质、颜色均匀, 湿心材比例低, 加工性能好, 但尺寸稳定性差, 且不耐腐, 限制了毛白杨木材的利用范围。笔者采用蒸汽介质热处理方法, 对毛白杨木材进行高温热处理, 旨在确定不同用途的热处理改性毛白杨木材的最佳工艺提供科学依据。

收稿日期: 2009-08-26; 修改日期: 2010-04-06

基金项目: 引进国际先进林业科学技术创建新项目(948计划)(2006-4-C03)

作者简介: 黄荣凤(1963—), 女, 中国林科院木材工业研究所副研究员, 博士。

通讯作者: 吕建雄, 男, 中国林科院木材工业研究所研究员, 博士生导师。

1 材料与方法

1.1 材料

毛白杨(*Populus tomentosa*) 试材采自山东冠县, 15株, 树龄20年, 胸径25~33 cm, 长度3 m(取自树木的1.3~4.5 m高处)。

1.2 方法

1.2.1 试件制取

将原木锯解成 5 段,将每段的端面按顺序等距分 8 个方向,在每个方向上分别截取端面为 50 mm (T) × 25 mm (R)、长为 500 mm 的试件。从每株树木取 40 个试件,按“株数+方向+高度”的编码方法依次编号,从中随机抽取 26 个试件用于热处理。热处理前木材干燥至含水率 8% 左右。

1.2.2 试件热处理

热处理温度设定为 170、185、200、215、230 ℃,处理时间设定为 1、2、3、4、5 h,共 25 组处理条件,另设一组对照试件。采用完全随机区组设计方法,每组处理条件的最小重复数为:≥ 12/(26-1) + 1,即 2(取整)。本试验采用 15 个重复,即每组处理条件下的试件数量为 15 个。

热处理设备由德国产木材干燥机(Lognmat)改造而成,安装了蒸汽发生器(蒸汽温度为 152 ℃)和氧化锆分析仪。在热处理过程中,根据氧化锆分析仪检测的干燥箱中的氧含量数据,控制蒸汽发生器喷蒸,以过热蒸汽取代氧气,从而实现氧含量的控制。达到热处理温度后,氧气含量控制在 2% 以下。

1.2.3 试件性能检测

物理性能检测密度、体积湿胀率和体积干缩率 3 项指标,以分析毛白杨热处理材的尺寸稳定性;力学性能检测抗弯强度(modulus of rupture, MOR)、抗

弯弹性模量(modulus of elasticity, MOE)和硬度 3 项指标,以分析毛白杨热处理材作为户外景观建筑用材和室内装饰用材的可行性;改性效果评价选择了抗胀缩率(anti-swelling efficiency, ASE-sw 和 anti-shrinking efficiency, ASE-sh)、抗弯强度变化率和硬度变化率,作为评价指标。

密度、干缩性、湿胀性、MOR 和 MOE 的测试,分别按 GB 1927~1943-2009 进行,硬度测试按照日本标准 JIS Z 2101-1994 进行。

根据测试结果计算木材的失重率、ASE 和抗弯强度变化率、硬度变化率。

失重率 = $\frac{\text{对照材质量} - \text{处理材质量}}{\text{对照材质量}} \times 100\%$ (1)

ASE-sw = $\frac{\text{对照材湿胀率} - \text{处理材湿胀率}}{\text{对照材湿胀率}} \times 100\%$ (2)

ASE-sh = $\frac{\text{对照材干缩率} - \text{处理材干缩率}}{\text{对照材干缩率}} \times 100\%$ (3)

2 结果与分析

2.1 物理性能变化(图 1)

由图 1 可以看出,毛白杨木材经热处理后,全干密度、失重率、体积干缩率和体积湿胀率等物理性能均发生了明显的变化,但各个性能指标发生显著变化时的处理温度和处理时间不同。

1) 失重率:如图 1A 所示,总体上随着处理温度的提高和处理时间的延长,木材的失重率明显增加。

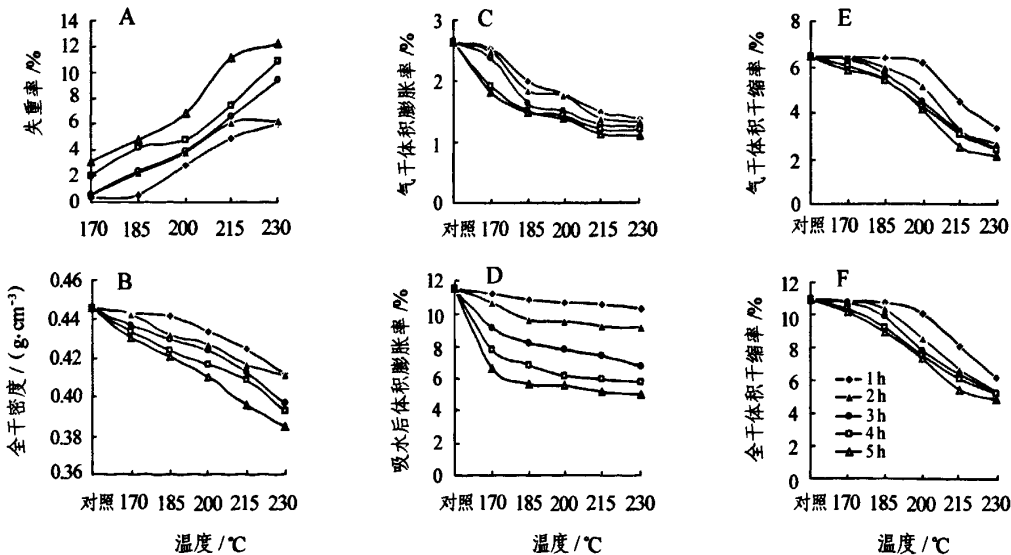


图 1 毛白杨热处理材的物理性能变化
Fig. 1 Chinese white poplar physical properties before and after heat treatment

在温度 $\leq 185\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下处理 1 h,木材的失重率变化甚微;当处理温度升至 $215\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,木材的失重率急剧增加;在 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度条件下处理 5 h 后,木材的失重率达到 12.2%。

2) 密度:高温处理导致木材质量损失,体积缩小,因此,木材密度的变化趋势与失重率不完全相同。图 1B 显示,木材的全干密度随着处理温度的升高和处理时间的延长而降低;而且,处理时间越长,木材密度随温度变化的曲线越接近直线。未处理材密度为 0.446 g/cm^3 ,在 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下处理 5 h 后,木材的密度降至 0.385 g/cm^3 ,降幅为 13.6%。

3) 体积湿胀率:从图 1C、1D 可见,随着处理温度的提高和处理时间的延长,处理材的体积湿胀率均呈下降趋势。未处理材吸水后的体积湿胀率为 11.52%,在 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下处理 5 h 后降至 5.02%;当处理温度相同时,处理时间对吸水后体积湿胀率的影响,

比对气干体积湿胀率的影响显著。在处理温度达到 $185\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,木材的气干湿胀率和吸水后湿胀率均显著下降,之后下降趋势趋于平缓,可能是由于 $185\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温作用,木材半纤维素大量降解所致。

4) 体积干缩率:图 1E、1F 表明,热处理毛白杨木材的气干干缩率和全干干缩率的变化趋势基本一致。处理温度 $185\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,热处理对改善木材干缩率的效果不明显;在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 处理 2 h 以上时,木材的体积干缩率显著降低;在 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下处理 5 h 后,木材的气干体积干缩率和全干体积干缩率分别降至 2.12% 和 4.89%。热处理毛白杨木材体积干缩率发生显著变化的条件,与其纤维素含量发生显著变化的条件一致^[3],表明在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 处理 2 h 时,毛白杨木材半纤维素、纤维素大量降解,分子中的羟基减少,故木材的吸水性降低,尺寸稳定性提高。

2.2 力学性能变化(图 2)

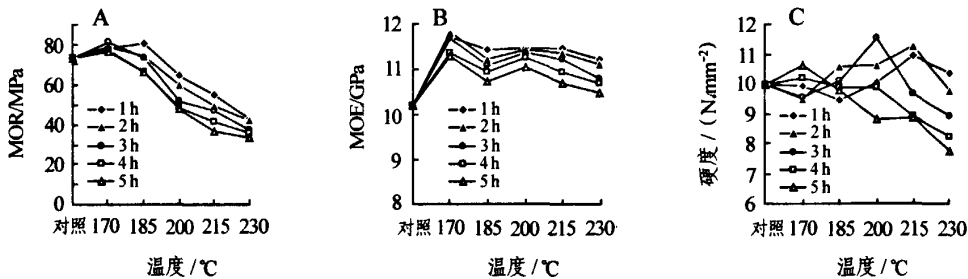


图 2 毛白杨热处理材的力学性能变化

Fig. 2 Chinese white poplar mechanical properties before and after heat treatment

1) MOR:图 2A 显示,未处理材的 MOR 为 73.32 MPa ;在温度低于 $185\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、时间短于 2 h 的条件下处理,木材的 MOR 有所提高;之后,随着温度的升高和时间的延长,木材的 MOR 开始降低,在 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、5 h 时降至最低 33.58 MPa 。

2) MOE:图 2B 表明,所有处理材的 MOE 均有不同程度的增强,以 $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 处理提高的效果最显著。在 $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下处理 2 h 后,木材的 MOE 达到峰值 11.81 GPa ;之后,随着处理温度的升高,MOE 反而降低,在 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ 处理 5 h 后降至 10.48 GPa ,这一变化趋势与热处理樟子松木材^[4]非常接近。

3) 硬度:由图 2C 可以看出,在温度 $\leq 185\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,短时间的热处理会增强木材的硬度,但处理温度 $> 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、处理时间 $> 4\text{ h}$ 时,木材的硬度明显降低。未处理材的硬度为 10.0 N/mm^2 ,处理材的硬度最大为

11.6 N/mm^2 ,最小仅 7.8 N/mm^2 。

2.3 改性效果评价(图 3)

1) 抗胀缩率:从图 3A、3B 可以看出,随着处理温度的提高和处理时间的延长,毛白杨木材的 ASE 显著提高,而且 ASE-sw 和 ASE-sh 的提高程度基本一致;在 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ 处理 5 h 时,木材的 ASE 可以提高 55% 以上。对不同处理温度和处理时间下的干缩率和湿胀率进行多重比较(表 1),结果表明:处理温度提高 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$,相比同样温度下处理时间增加 1 h,对提高毛白杨木材尺寸稳定性的效果显著。

2) MOR 变化率:图 3C 显示处理材的 MOR 相对于对照材的变化率。 $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的热处理可使木材的 MOR 提高 10% 以上,但 ASE-sh 和 ASE-sw 提高不显著; $185\text{ }^{\circ}\text{C}$ 处理 3 h 以上时,木材 MOR 的降幅低于 10%,但 ASE-sh 和 ASE-sw 均可提高 20%; $200\text{ }^{\circ}\text{C}$

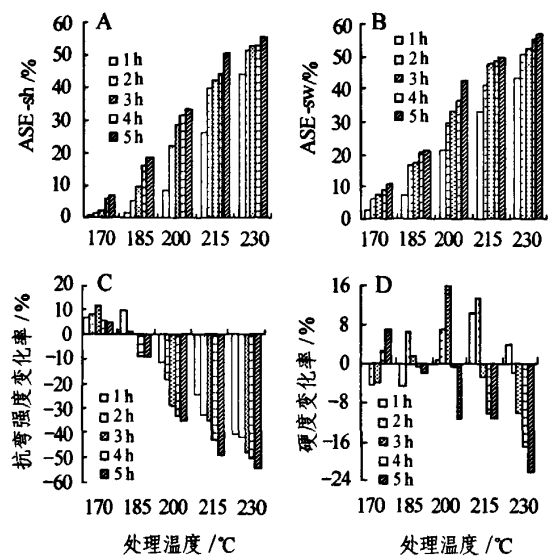


图3 毛白杨热处理材的物理力学性能变化率
Fig. 3 Change rates of properties for heat-treated Chinese white poplar

表1 毛白杨热处理材物理力学性能的多重比较
Tab. 1 Multiple comparison of heat-treated Chinese white poplar properties

因子	水平	全干密度/ (g·cm ⁻³)		体积干缩率/%				体积湿胀率/%				MOR/ MPa		MOE/ GPa		硬度/ (N·mm ⁻²)	
		平均值	差异	气干		全干		气干		吸水		平均值	差异	平均值	差异	平均值	差异
				平均值	差异	平均值	差异	平均值	差异	平均值	差异						
处理温度/℃	170	0.437	A	6.17	A	10.60	A	2.228	A	10.71	A	78.41	A	11.57	A	10.18	A
	185	0.429	B	5.77	B	9.84	B	1.700	B	9.62	B	72.00	B	11.09	B	9.97	A
	200	0.422	C	4.84	C	8.27	C	1.580	B	7.82	C	54.40	C	11.32	C	9.96	A
	215	0.412	D	3.30	D	6.53	D	1.296	C	6.50	D	45.95	D	11.14	C	9.94	A
处理时间/h	230	0.399	E	2.57	E	5.35	E	1.254	C	5.61	E	38.57	E	10.86	D	9.01	B
	1	0.431	A	5.34	A	9.19	A	1.836	A	9.07	A	64.22	A	11.46	A	10.35	A
	2	0.426	B	4.67	B	8.35	B	1.766	A	8.23	B	60.74	BA	11.38	A	10.14	BA
	3	0.420	C	4.42	CB	8.01	CB	1.610	B	7.92	CB	58.26	B	11.23	B	9.95	B
	4	0.415	D	4.21	CD	7.68	CD	1.462	C	7.66	CD	53.96	C	11.04	C	9.43	C
	5	0.409	E	4.01	D	7.37	D	1.384	C	7.39	D	52.14	C	10.85	D	9.17	C

3 结论

1) 在本试验条件下,随着处理温度的提高和处理时间的延长,热处理毛白杨木材的物理力学性能指标均呈现规律性变化。多重比较结果表明,处理温度提高 15℃,相比同样温度下处理时间增加 1 h,对毛白杨木材 MOR 的影响显著,但对硬度的影响不显著。

2) 在不考虑材色要求的情况下,毛白杨木材优化热处理条件为:温度低于 185℃、时间 5 h,其 MOR 损失低于 10%,抗胀缩率提高 20%以上。

3) 由于所有处理材的 MOE 均高于对照材,因此在选择处理工艺时可以不考虑对 MOE 的影响。实际生产中可以根据对热处理材物理力学性能的要

求及用途,参考处理材的性能变化与处理条件的关系,选择优化处理工艺。

参考文献:

1) 处理 2 h 后,木材的 MOR 降低约 30%,ASE-sh 提高近 30%,ASE-sw 提高 33%;230℃高温处理,木材的 ASE-sh 和 ASE-sw 提高 55%以上,但 MOR 的降幅亦达 55%以上。

3) 硬度变化率:图 3D 显示处理材的硬度相对于对照材的变化率,可见,热处理对毛白杨木材硬度的影响小于其对 MOR 的影响。185℃以下的处理材,其硬度提高约 6%;更高温度的处理材,硬度降低,但降幅远远低于 MOR;215℃的处理材,硬度的降幅最大约 12%;在 230℃条件下处理 5 h 的木材,硬度降低 22%。

从表 1 多重比较结果可以看出,处理温度提高 15℃,相比同样温度下处理时间增加 1 h,对毛白杨木材 MOR 的影响显著,但对硬度的影响不显著;所有处理材的 MOE 均高于未处理材(图 2B)。因此,在分析热处理对毛白杨木材力学性能的影响时,应优先考虑热处理对木材 MOR 的影响。

[1] Kubojima Y, Okano T, Ohta M. Bending strength and toughness of heat-treated wood[J]. Journal of Wood Science, 2000, 46 (1):8-15.

[2] 李惠明,陈人望,严婷. 高温热处理木材性能测试研究[J]. 中国木材保护, 2009, 25(1):13-20.

[3] 曹永建. 蒸汽介质热处理木材性质及其强度损失控制原理[D]. 北京:中国林科院博士学位论文, 2008.

[4] 李惠明,陈人望,严婷. 热处理改性木材的性能分析 I [J]. 木材工业, 2009, 23(2):43-45.

(责任编辑 向琴)