

# 基于石蜡导热介质的毛白杨热处理工艺优化

张英杰<sup>1</sup>,冯德君<sup>2\*</sup>,窦延光<sup>3</sup>

(1. 杨凌职业技术学院,陕西 杨陵 712100;2. 西北农林科技大学 林学院,陕西 杨陵 712100;  
3. 陕西省林业工业产品质量监督检验站,陕西 西安 710082)

**摘 要:**为了获得较优的石蜡为导热介质的毛白杨热处理工艺,采用3种不同温度和时间进行正交试验,并对处理材进行物理、力学性能分析。结果表明,较素材对比,热处理材吸湿率有较大的减小;抗弯弹性模量无较大变化;抗弯强度下降较明显;顺纹抗压强度和横纹抗压强度显著增加;较优热处理工艺为,处理温度185℃、时间3.5 h或者处理温度195℃、时间2.5 h。  
**关键词:**石蜡;毛白杨;热处理;工艺优化  
**中图分类号:**S781.6      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2017)01-0248-05

## Optimization of *Populus tomentosa* Thermo-treatment Process Based on Paraffin Thermal Conductive Medium

ZHANG Ying-jie<sup>1</sup>, FENG De-jun<sup>2\*</sup>, DOU Yan-guang<sup>3</sup>

(1. Yangling Vocational & Technical College, Yangling, Shaanxi 712100, China;  
2. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;  
3. Forestry Industry Products Quality Monitoring and Examination Office in Shaanxi, Xi'an, Shaanxi 710082, China)

**Abstract:** In order to obtain the reasonable optimization of *Populus tomentosa* thermo-treatment process based on paraffin thermal conductive medium, three kinds of temperatures and time were applied to treat the samples. The method of orthogonal experimental design was adopted. The results indicated that compared with the untreated wood, moisture absorption of thermo-treated wood was greatly reduced. MOE had no obvious change. MOR decreased significantly. Compressive strength parallel and perpendicular to grain of wood increased remarkably. It showed that 185℃ and 3.5 h or 195℃ and 2.5 h were the optimal combination of thermo-treated process.  
**Key words:** paraffin wax; *Populus tomentosa*; high temperature thermo-treatment; process optimization

木材高温热处理是高效利用木材、提高利用率的有效手段,通过热处理可以提高木材的尺寸稳定性,降低吸湿率,改善耐腐蚀性、耐候性,实现产品品种的多样化,提高其附加值<sup>[1]</sup>。  
根据高温热处理所采用的隔氧保护介质不同,木材热处理主要分为3类:蒸汽处理工艺、惰性气体处理工艺及热油处理工艺<sup>[2-5]</sup>。蒸汽处理会导致木材强度有所降低;惰性气体处理会导致木材表面硬化,脆性增大;热油处理成本较高,且会造成木材表面污染<sup>[6-7]</sup>。寻找综合性能好、环境友好型导热介质成为国内外木材热处理研究的热点。有研究表明,利用石蜡热处理木材可以使木材含水率接近于0<sup>[8]</sup>,而且能使处理后木材强度高、表面不发生硬化、不污染材面。为了获得综合性能好的木材热处理工艺,本研究采用石蜡为隔氧保护介质,对毛白杨木材进行了热处理研究,分析热处理木材的吸湿性与力学强度变化,确定了优化的热处理工艺。

收稿日期:2016-04-09    修回日期:2016-07-06  
基金项目:陕西省教育厅 2013 年科学研究计划(自然科学专项)项目(2013JK0709);杨凌职业技术学院 2011 年科学研究基金项目(A2011013)。  
作者简介:张英杰,男,副教授,研究方向:木材科学与技术。E-mail:zhangy1234@163.com  
\*通信作者:冯德君,男,副教授,研究方向:木材及木材功能性改良。E-mail:mcyjs\_fdj@163.com

1 材料与方法

1.1 材料与设备

毛白杨(*Populus tomentosa*)采自于西北农林科技大学试验林场,树龄 10 a,试材采集依据国家标准 GB/T1927-2009 进行。经过气干,含水率达到 12%后,根据 GB/T1929-2009,GB/T1930~1941-2009 加工成 20 mm(R)×20 mm(T)×300 mm(L)。

万能试验机:深圳新三思公司制造;  
游标卡尺(0~200 mm);  
电子天平(0.001):型号为 SHANPING JA2003,上海天平仪器厂制造;

智能恒温恒湿箱:型号为 HWS,宁波辅仪器有限公司制造;

可调式电热板:型号为 ML-1.8-4,北京科伟永兴仪器公司;

电热恒温鼓风干燥箱:DHG-9123A 型,上海一恒科技有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 木材高温热处理过程 木材高温热处理过程主要分为 3 个阶段:

第一阶段:温度升高及高温干燥阶段。采用石蜡油加热,温度迅速升高到 100℃左右后,再缓慢上升到 130℃,此阶段进行的是高温干燥,目的是把木材内部的含水率几乎降到 0,即绝干状态。

第二阶段:热处理炭化阶段。高温干燥的进行,

石蜡油的温度上升到 185℃到 205℃之间,最终的温度由处理材的等级来决定,当达到所要求的温度以后,根据最后处理材不同的用途保持热处理时间 2.5~4.5 h。

第三阶段:冷却阶段。热处理结束,即让石蜡油自然冷却,当温度降到 80~90℃时,将热处理木材从石蜡油中取出。

1.2.2 热处理工艺 试验工艺采用石蜡油作为加热介质对木材进行热处理,试验温度和处理时间分别选取 3 个水平(185、195、205℃;2.5、3.5、4.5 h)进行双因素交互式全试验<sup>[9-10]</sup>。考虑到热处理木材的使用条件,热处理结束后将石蜡油的温度降到 80~90℃,取出热处理试材,置于恒温恒湿箱中,在温度 20℃,相对湿度 65%的条件下调质处理达到 4%~7%<sup>[11]</sup>,分别测定热处理后的试件以及作为对照的未处理试材的各项性能。

2 结果与分析

2.1 物理性能

2.1.1 吸湿率 热处理结束后,对处理材依据 GB/T1934.2-2009 进行吸湿率测试(表 1)。由表 1 可以看出,热处理材的吸湿率较素材相比,有非常大的减小。但随着恒温恒湿处理时间的增加,热处理材的吸湿率呈不断增大的趋势,增加的速率越来越慢。在温度为 195℃,处理时间为 3.5 h 时,热处理材的吸湿率最小。

表 1 热处理木材与素材吸湿率

Table 1 The moisture absorption rate of thermo-treated and untreated woods

类别	处理温度/℃	处理时间/h	吸湿率/%						
			6 h	12 h	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h
热处理材	185	2.5					0.69	0.73	0.76
		3.5					0.76	0.80	0.84
		4.5					0.60	0.64	0.68
	195	2.5					0.45	0.49	0.53
		3.5					0.38	0.43	0.47
		4.5	0.59	0.59	0.60	0.63	0.65	0.69	0.72
	205	2.5	0.46	0.47	0.48	0.52	0.55	0.59	0.62
		3.5	0.42	0.43	0.46	0.50	0.55	0.59	0.62
		4.5	0.56	0.56	0.58	0.60	0.64	0.69	0.71
素材			2.22	2.46	2.84	3.36	3.76	4.10	4.38

2.1.2 线性膨胀率 线性胀缩率是木材尺寸稳定性的重要指标。依据 GB1934.2-2009,将经热处理的试件和未处理对照试件放置于调温调湿箱中进行吸湿处理,在温度 20±2℃、相对湿度 65%±3%的条件下存放 3 d 后,取出称重和测定试件的弦、径向尺寸<sup>[9]</sup>。分别进行热处理材与素材的弦向与径向线

性膨胀率测定(表 2、表 3)。由表 2、表 3 可见,热处理材弦向、径向线性膨胀率随着恒温恒湿处理时间的增加,呈不断增大的趋势。热处理材在处理过程中,随着纤维素、半纤维素的降解,导致吸水性羟基的数量减少,木材的抗胀性增大,呈现出弦向、径向线性收缩率较素材有较大减小的趋势。

表 2 热处理材与素材弦向线性胀缩率

Table 2 The tangential expansion and shrinkage rate of thermo-treated and untreated woods

组号	处理温度/℃	处理时间/h	弦向线性胀缩率/%					
			6 h	12 h	24 h	48 h	72 h	96 h
热处理材	185	2.5					0.05	0.50
		3.5					0.15	0.30
		4.5					0.20	0.56
	195	2.5					0.10	0.41
		3.5					—	0.41
		4.5					—	0.45
	205	2.5	0.36	1.08	0.36	0.36	0.26	0.62
		3.5	0.46	0.41	0.41	0.56	0.30	0.51
		4.5	0.73	0.78	1.46	1.46	0.83	0.88
素材			4.76	4.81	5.02	5.02	5.02	5.02

表 3 热处理材与素材径向线性胀缩率

Table 3 The radial expansion and shrinkage rate of thermo-treated and untreated woods

类别	处理温度/℃	处理时间/h	径向线性胀缩率/%					
			6 h	12 h	24 h	48 h	72 h	96 h
热处理材	185	2.5					0.00	0.63
		3.5					—	—
		4.5					0.37	0.35
	195	2.5					0.20	0.00
		3.5					—	0.35
		4.5	0.20	0.20	0.10	0.20	—	—
	205	2.5	0.44	0.49	0.59	0.39	0.39	0.49
		3.5	0.35	0.45	0.25	0.45	0.15	0.40
		4.5	0.55	0.65	0.65	1.05	0.50	0.00
素材			2.71	2.81	2.86	2.86	2.86	2.86

2.1.3 材色的直观性 木材经过热处理后,材色发生较大的变化,通过观察,发现随着处理温度的升高,试材的明度朝着变暗的趋势发展,在同一处理温度的条件下,随着热处理时间的延长,试材的明度也朝着变暗的趋势发展。

2.2 力学性能

2.2.1 抗弯弹性模量 抗弯弹性模量是按照 GB1936.1-2009 准备试件并在万能电子力学试验机上进行测试的,试验加载速度为 1.7 mm·min<sup>-1</sup>,温度一定,时间与热处理材抗弯弹性模量变化曲线如图 1(a)所示,时间一定,温度与热处理材抗弯弹性模量变化曲线如图 1(b)所示。

由图 1 可以看出,热处理材在温度不变、时间增加的情况下,抗弯弹性模量呈现出先增长后减小的趋势,但前后变化的幅度不大,在时间不变、温度增加的情况下,呈现出相同的变化趋势。与素材的抗弯弹性模量相比,热处理材的抗弯弹性模量并没有出现较大的变化,这说明热处理条件对抗弯弹性模量的影响不显著。比较适合的工艺为:185℃、2.5 h;185℃、3.5 h;195℃、2.5 h;195℃、3.5 h。

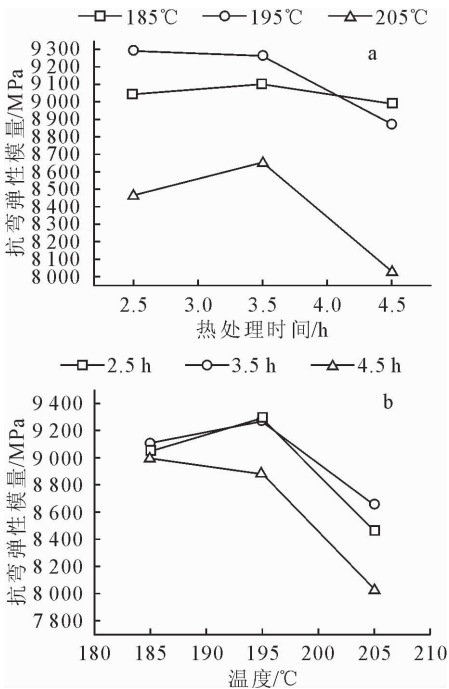


图 1 不同工艺热处理材抗弯弹性模量变化  
Fig. 1 The MOE of hthermo-treated wood by different processes

2.2.2 抗弯强度 抗弯强度是按照 GB1936. 2-2009 准备试件并在万能电子力学试验机上进行测试的,试验加载速度为  $6\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,温度一定,时间与热处理材抗弯强度变化曲线如图 2(a)所示,时间一定,温度与热处理材抗弯强度变化曲线如图 2(b)所示。

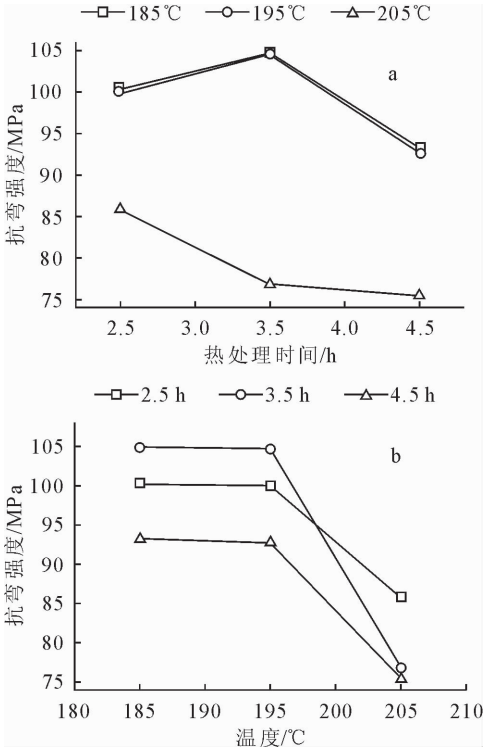


图 2 不同工艺热处理材抗弯强度变化

Fig. 2 The MOR of hthermo-treated wood by different processes

热处理材的抗弯强度与素材的抗弯强度相比,有明显的下降。由图 2 可以看出,热处理材在温度不变、处理时间增加的情况下,抗弯强度呈现下降的趋势,但均比素材的抗弯强度值低,在时间不变、处理温度增加的情况下,抗弯强度也呈现同样的趋势。随着处理温度 and 时间的增加,抗弯强度一直下降。比较适宜的工艺为:185℃、2.5 h;185℃、3.5 h;195℃、2.5 h;195℃、3.5 h。

2.2.3 顺纹抗压强度 顺纹抗压强度是按照 GB1935-2009 准备试件并在万能电子力学试验机上进行测试的。试验进行的速度为  $0.4\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,温度一定,时间与热处理材顺纹抗压强度变化曲线如图 3(a)所示,时间一定,温度与热处理材顺纹抗压强度变化曲线如图 3(b)所示。

热处理材的顺纹抗压强度与素材相比,有明显的增加。由图 3 可以看出,热处理材在温度不变、处理时间增加的情况下,顺纹抗压强度呈现先微弱增加后下降的趋势,但变化的幅度不大,在处理时间不

变、温度增加的情况下,顺纹抗压强度呈现相同的趋势。比较适宜的工艺为:185℃、3.5 h;195℃、2.5 h;195℃、3.5 h;195℃、4.5 h。

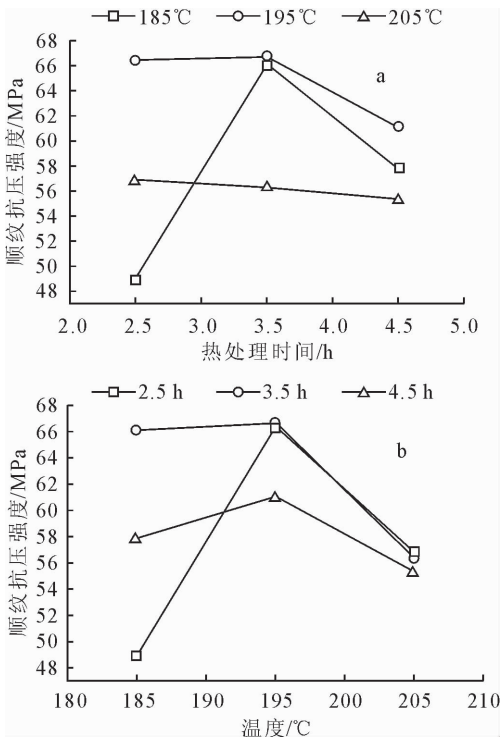


图 3 不同工艺热处理材顺纹抗压强度变化

Fig. 3 The compressive strength parallel to grain of hthermo-treated wood by different process

3 结论与讨论

随着热处理温度的升高和时间的延长,热处理材弦向和径向的线性胀缩率不断降低,主要原因是半纤维素的热解、细胞壁物质的聚合状态发生了改变,木材细胞壁纤维素准结晶无定形区内微纤丝的排列更加有序,向结晶区靠拢,使纤维素游离羟基数量减少,从而降低了吸湿率,提高了热处理材尺寸稳定性<sup>[9-10]</sup>。

石蜡为导热介质的木材热处理后,木质素和抽提物发生部分分解,纤维素和半纤维素多糖类物质降低,生成更多的羰基和羧基,木素含量的增加以及木素氧化反应等变化,使得颜色逐渐加深<sup>[12-13]</sup>。

采用石蜡为导热介质对木材热处理后,木材中的半纤维素降解、少量纤维素和木质素参与反应,抽提物的减少,降低了木材纤维素与半纤维素的联结,使得抗弯强度有所下降<sup>[14-16]</sup>。石蜡热处理工艺对木材顺纹抗压强度有明显增加,对抗弯弹性模量影响较小。主要是由于热处理过程中,纤维素相对稳定,影响较小,而半纤维素发生热解反应,从某种程度上增加了木材的结晶度,另外,热处理木材降解产物与木质素、木质素分子之间发生了交联反应,增大了结

晶区<sup>[17-19]</sup>。

综合物理性能及力学性能的分析,石蜡热处理较优工艺为:热处理温度为 185℃、处理时间为 3.5 h 和热处理温度为 195℃、处理时间为 2.5 h。

参考文献:

[1] TJEERDSMA B F, MILITZ H. Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood[J]. Holz Als Roh-und Werkstoff, 2005, 63(2): 102-111.

[2] KARNDERN D P, PIZZA A, JERMANN A. Durability of heat-treated wood[J]. Holz Als Roh-und Werkstoff, 2002, 60: 1-6.

[3] KORTELAINE S M, ANYIKAINEN T, VIITANIEMI P. The water absorption of sapwood and heartwood of scots pine and norway spruce heat-treated at 170℃, 190℃, 210℃ and 230℃[J]. Holz Als Roh-und Werkstoff, 2006, 64: 192-197.

[4] BOONSTRA M J, TJEERDSMA B. Chemical analysis of heat treated softwoods[J]. Holz Als Roh-und Werkstoff, 2006, 64: 204- 211.

[5] BORREGA M, KAREN LARNPI P. Mechanical behavior of heat-treated spruce (*Picea abies*) wood at constant moisture content and ambient humidity[J]. Holz Als Roh-und Werkstoff, 2008, 66: 63-69.

[6] ANDREJA K, FREDERICK A, KAMKE E. Compression of wood under saturated steam, superheated steam, and transient conditions at 150℃, 160℃, and 170℃[J]. Wood Sci. Technol., 2012, 46: 73-88.

[7] WANG J Y, COOPER P A. Effect of oil type, temperature and time on moisture properties of hot oil-treated wood[J]. Holz Als Roh-und Werkstoff, 2005, 63(6): 417-422.

[8] 庄汝芳, 王建华. 利用石蜡热处理木材使木材的含水率接近于零的方法: 200710026038. 6[P]. 2008-02-06.

[9] 冯德君, 赵泾峰. 热处理木材吸湿性及尺寸稳定性研究 [J]. 西北林学院学报, 2011, 26(2): 200-202.

FENG D J, ZHAO J F. Heat treatment of wood hygroscopicity and dimensional stability [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(2): 200-202. (in Chinese)

[10] 李贤军, 傅峰, 蔡志勇, 等. 高温热处理对木材吸湿性和尺寸稳定性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(6): 92-96.

LI X J, FU F, CAI Z Y, *et al.* The effect of high temperature thermal treatment on moisture absorption and dimension stability of wood [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2010, 30(6): 92-96. (in Chinese)

[11] 丁涛, 顾炼百, 江宁. 高温热处理实木地板的尺寸稳定性[J].

木材工业, 2008, 22(6): 37-39.

DING T, GU L B, JIANG N. Dimensional stability of heat-treated solid wood flooring [J]. China Wood Industry, 2008, 22(6): 37-39. (in Chinese)

[12] 江京辉, 吕建雄. 高温热处理对木材颜色变化影响综述[J]. 世界林业研究, 2012, 25(1): 40-43.

JIANG J H, LYU J X. Review on color change of heat treated wood at high temperature [J]. World Forestry Research, 2012, 25(1): 40-43. (in Chinese)

[13] 邓绍平, 陈寒娟, 林金春, 等. 高温热处理人工林杉木木材的材色和涂饰性能[J]. 福建农林大学学报, 2010, 39(5): 484-489.

[14] 江京辉, 吕建雄. 高温热处理对木材强度影响的研究进展[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2012, 36(2): 133-136.

JIANG J H, LYU J X. Research progress in effect of heat treatment on wood strength [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2012, 36(2): 133-136. (in Chinese)

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

LI H M, CHENG R W, YAN T. Physical and mechanical properties of heat-treated lumber I [J]. China Wood Industry, 2009, 23(2): 43-45. (in Chinese)

[16] 李涛, 顾炼百. 185℃高温热处理对水曲柳木材力学性能的影响[J]. 林业科学, 2009, 45(2): 92-97.

LI T, GU L B. Effects of high temperature heat treatment at 185℃ on mechanical properties of ash wood[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(2): 95-97. (in Chinese)

[17] 陈康乐, 冯德君, 张英杰, 等. 高温热处理对木材力学性能的影响[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(5): 164-166.

CHEN K L, FENG D J, ZHANG Y J. *et al.* Effects of high temperature heat treatment on mechanical properties of wood [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(5): 164-166. (in Chinese)

[18] 范文俊, 涂登云, 彭冲, 等. 热处理对毛白杨木材力学性能的影响机理[J]. 东北林业大学学报, 2015, 43(10): 88-91.

FAN W J, TU D Y, PENG C, *et al.* Influence of heat treatment on mechanical properties of *Populus tomentosa* wood [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2015, 43(10): 88-91. (in Chinese)

[19] 蔡家斌, 李涛, 张柏林, 等. 高温热处理对樟子松板材物理力学性能影响的研究[J]. 林产工业, 2009, 36(6): 31-34.

CAI J B, LI T, ZHANG B L, *et al.* Effects of high temperature heat treatment on the physical-mechanical properties of the mongolian scotch pine lumber [J]. China Forest Products Industry, 2009, 36(6): 31-34. (in Chinese)