

高温热处理杉木力学性能与尺寸稳定性研究

李延军 唐荣强 鲍滨福 孙 会

(浙江林学院工程学院)

摘要:以杉木为试材,采用 9 组热处理工艺对杉木进行了高温热处理试验。通过对热处理前后杉木力学性能和尺寸稳定性的比较,探讨了热处理温度和处理时间对其性能的影响。结果表明:随热处理温度的升高和时间的延长,试材的抗弯强度(MOR)和抗弯弹性模量(MOE)均呈下降趋势,但热处理温度影响更为显著;热处理对 MOR 的影响比 MOE 的要大;顺纹抗压强度随时间的变化规律并不明显,但随温度的升高逐渐降低。杉木热处理后,试材由绝干到气干和绝干到吸水尺寸稳定时 2 个阶段的径向线湿胀率、弦向线湿胀率、体积湿胀率均低于未处理材的,弦向线湿胀率大于径向线湿胀率;就整体而言,3 个指标均随处理温度的升高和时间的延长而减小。抗胀率均为负值,其绝对值随处理温度的升高和时间的延长而增大,尺寸稳定性增强幅度逐渐增大,且受温度的影响较为显著,在 210℃ 下降得最明显。

关键词: 高温热处理;杉木;力学性能;尺寸稳定性

中图分类号: S781.71 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2010)04-0232-05

LI Yan-jun; TANG Rong-qiang; BAO Bin-fu; SUN Hui. **Mechanical properties and dimensional stability of heat-treated Chinese fir.** *Journal of Beijing Forestry University* (2010) 32(4) 232-236 [Ch, 18 ref.] School of Engineering, Zhejiang Forestry College, Lin'an, 311300, P. R. China.

In this study, we selected Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) as the test material to investigate the effect of nine high-temperature heat treatment technologies. The mechanical properties and dimensional stability of the Chinese fir before and after heat treatment were determined to evaluate the effects of temperature and processing time on wood properties. The results show that the bending modulus of rupture (MOR) and the bending modulus of elasticity (MOE) of heat-treated Chinese fir decrease with increases in temperature and time, but the effect of temperature is more important. The MOR of heat treated Chinese fir increased much greater than the MOE. The compressive strength parallel to the grain showed no significant change over time, but decreased with temperature. The radial, tangential and volume swelling rates of the specimens were lower than those of untreated wood from oven-dry to air-dry (relative humidity 65%, temperature 20℃) and from oven-dry to the stage of dimensional stability in water absorption. The tangential swelling rate was greater than the radial swelling rate. On the whole, the three indices decreased with increases in temperature and time. Anti-shrink efficiency (ASE) of treated wood was negative and its absolute values increased with increases in temperature and time. The enhanced range of dimensional stability increased gradually, which was more affected by temperature and declined significantly at 210℃.

Key words high-temperature heat treatment; Chinese fir; mechanical properties; dimensional stability

高温热处理木材是指用 160 ~ 230℃ 的温度加热处理木材,改良木材的品质,降低木材的吸湿性和吸水性,提高尺寸稳定性、生物耐腐蚀性和耐气候性,

是一种性能优良、颜色美观且环境友好的木材产品^[1-2]。由于高温热处理不添加化学药剂,并且还可以通过调整工艺条件,制造出具有不同性能和颜

收稿日期:2009-10-13

基金项目:浙江省科学技术项目(2008C32023、2006C12047)、浙江省新世纪 151 第一层次人才资助项目。

第一作者:李延军,博士,教授。主要研究方向:木材改性与干燥技术。电话:13396520725 Email: lalyj@126.com 地址:311300 浙江省临安市浙江林学院工程学院。

本刊网址: <http://www.bjfujournal.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

色多样化的木材,因此将高温热处理技术应用于人工林速生材,一方面可以提高速生材尺寸稳定性和耐腐蚀性等性能,另一方面可以改变速生材颜色来替代部分优质天然林木材,提高其附加值,对人工林速生材的合理利用、天然林保护及环境保护具有重要的现实意义^[3]。

目前,我国的木材热处理技术尚处于起步阶段,而国际上热处理研究已经有很长一段时间,并取得了丰硕的成果。成果主要集中在木材高温热处理工艺、物理力学性能、防腐效果、化学成分分析及热处理反应机理研究等方面^[3-9]。国内学者充分借鉴国际上木材热处理的先进技术和研究成果并结合我国的森林资源状况,开展了木材热处理技术研究,并大力推广速生人工林的高效利用^[1-3,10]。在前期杉木(*Cunninghamia lanceolata*)高温热处理工艺研究的基础上,笔者开展了对热处理前后杉木力学性能和尺寸稳定性的研究,这有利于优化热处理工艺,有效地控制热处理木材的性能。

1 材料与方法

1.1 材料

人工林杉木木材采自浙江省临安市板桥林场,原木平均胸径为28 mm,树龄在28~32年之间,截取地面1.3 m以上的部分做试验。试材规格:22 mm×150 mm×350 mm(厚度×宽度×长度),将板材对半剖分,一半用做对照试材,另一半用做热处理试材。

1.2 设备

主要设备有EL-10KA型恒温恒湿箱、101型电热鼓风恒温干燥箱、日本ESPEC调温调湿箱、MWD-50型木材万能试验机、ST-85型数字式木材测湿仪(测量误差±1%)、自制小型木材热处理装置^[10]等。

1.3 方法

参考芬兰VVT和木制品工业已经联合开发的工业化规模的炭化木材生产工艺^[11-13],结合我国目前高温热处理木材(杉木)的实际生产工艺进行实验设计^[10]。温度是木材热处理工艺中最重要的因素,半纤维素是受温度影响最大物质。在100℃时,木材发生物理性质的变化主要是:纤维素吸收的水

分蒸发及干燥,纤维素大分子间的氢键断裂,纤维素的热容量增大,纤维素的化学性质不变;木材在高于150℃加热时,纤维素大分子的葡萄糖基开始发生脱水反应,纤维素的化学反应开始;木素只有在200℃以上时才发生热解。木材热处理维持的时间越长则热处理越完全,但应避免木材力学强度损失太大、注意节约能源等^[1,14]。因此,本次试验最高处理温度(简称热处理温度)分别为170、190、210℃,最高温度下保温时间(简称热处理时间)分别为2、3、4 h,进行2因素3水平的9组工艺试验。

将待处理的杉木试验板材按常规干燥工艺干燥至含水率低于12%,再快速升温至100℃后,缓慢升温到130℃干燥到绝干;然后快速升温到热处理目标温度和时间进行热处理;在处理过程中应适当喷蒸,处理结束后将温度降到50℃后调湿出窑^[10]。

1) 力学性能测试:将未处理材和热处理材置于相对湿度(RH)65%、温度20℃的恒温恒湿箱中进行调节,使其达到平衡含水率后,采用微机控制电子式木材万能试验机分别进行抗弯强度(MOR)、抗弯弹性模量(MOE)和顺纹抗压强度的测定。

为评价热处理条件对力学性能的影响效果,引入变化率(ξ)作为评价指标,计算公式为:

$$\xi = \frac{(M_{\text{后}} - M_{\text{前}})}{M_{\text{前}}} \times 100\%$$

式中: $M_{\text{后}}$ 为杉木热处理后的力学强度平均值, $M_{\text{前}}$ 为杉木热处理前的力学强度平均值。

ξ 为负值说明力学性能下降,变化率值越小说明下降幅度越大; ξ 为正值说明力学性能提高。

2) 尺寸稳定性测试:以抗胀率(ASE)来评价改性木材尺寸的稳定性,计算公式为:

$$\text{ASE} = \frac{(S_2 - S_1)}{S_1} \times 100\%$$

式中: S_1 为未处理材的体积湿胀率, S_2 为处理材的体积湿胀率。

2 结果与分析

充分考虑到热处理材的使用环境,试材的力学性能在对应的每个工艺下的含水率条件下测得(相对湿度65%、温度20℃),其平衡含水率见表1。

表1 试材的平衡含水率

Tab. 1 Equilibrium moisture content of specimens

%

处理工艺	170-2	170-3	170-4	190-2	190-3	190-4	210-2	210-3	210-4	未处理
平衡含水率	11.0	10.2	9.9	9.4	9.4	7.6	8.2	7.8	6.9	12.2

注:处理工艺170-2代表热处理温度为170℃、热处理时间为2 h的工艺条件,以此类推。下同。

2.1 热处理温度与时间对抗弯强度的影响

热处理前后杉木的 MOR 见表 2。从表 2 可知:杉木经热处理后, MOR 随热处理温度的升高和热处理时间的延长, 降低幅度逐渐增大。在相同的处理时间下, 170、190℃ 下变化率差异性较小, 而 210℃ 时变化率突变。这是由于木材中半纤维素对高温敏感性较高, 且耐热性差, 木材热处理后损失的主要是半纤维素, 而半纤维素在细胞壁中起黏结作用, 故热解后削弱了木材的强度^[14]; 当温度升高至 210℃

时, 利于半纤维素分解等化学反应的进行, 反应更加剧烈, 降解程度加大, 强度下降幅度加大; 同时, 由于木材中含有少量水分, 在热和水的作用下, 会产生酸类物质, 促进纤维素的水解, 引起苷键断裂, 聚合度降低, 这也可能引起热处理后木材强度的下降^[15]。在相同处理温度条件下, 随时间的延长, MOR 变化并不大。可见, 热处理温度对 MOR 的影响比热处理时间更加显著。

表 2 热处理前后杉木的抗弯强度

Tab. 2 Bending modulus of rupture of heat-treated and untreated Chinese fir

处理 工艺	未处理材			处理材			变化率 /%
	平均值 /MPa	变异系数 /%	准确指数 /%	平均值 /MPa	变异系数 /%	准确指数 /%	
170-2	63.6	6.6	5.0	62.4	7.3	3.8	-1.89
170-3	71.2	4.6	2.9	69.7	6.0	3.3	-2.11
170-4	68.9	4.9	3.5	65.3	5.9	2.9	-5.22
190-2	74.0	4.6	3.2	72.2	9.1	4.5	-2.43
190-3	60.0	5.3	3.7	58.4	9.3	4.8	-2.67
190-4	64.5	3.5	2.5	60.5	9.9	6.6	-6.20
210-2	62.2	5.7	3.8	51.0	11.0	7.3	-18.01
210-3	60.8	4.4	2.8	49.1	7.3	4.6	-19.24
210-4	62.2	5.3	3.8	50.1	8.7	5.8	-19.45

2.2 热处理温度与时间对抗弯弹性模量的影响

热处理前后杉木的 MOE 见表 3。从表 3 可知:杉木经热处理后, MOE 随处理温度的升高和热处理时间的延长降低幅度逐渐增大。在相同的处理时间下, 170、190℃ 下变化率差异性较小, 而 210℃ 时变化率突变。这是由于纤维素赋予木材弹性和强度, 木素赋予木材硬度和刚性^[16]。纤维素、木素的热稳定性均比半纤维素好, 在 170、190℃ 下可以认为纤

维素、木素不会发生分解或部分分解, 只是在局部结构发生了微小的变化^[14], 因此高温热处理试材的 MOE 变化甚微; 另外木材中纤维素的水解, 引起苷键断裂, 聚合度降低, 这也会引起热处理后试材 MOE 的下降。在相同处理温度条件下, 随时间的延长, MOE 变化并不大。可见, 热处理温度对 MOE 的影响比热处理时间显著。

表 3 热处理前后杉木的抗弯弹性模量

Tab. 3 Bending modulus of elasticity of heat-treated and untreated Chinese fir

处理 工艺	未处理材			处理材			变化率 /%
	平均值 /MPa	变异系数 /%	准确指数 /%	平均值 /MPa	变异系数 /%	准确指数 /%	
170-2	9 135	4.1	2.9	9 093	4.7	2.3	-0.46
170-3	9 105	4.1	2.6	9 100	5.3	2.9	-0.05
170-4	9 495	4.9	3.5	9 438	5.4	2.7	-0.60
190-2	9 548	4.2	3.2	9 524	4.3	2.2	-0.25
190-3	9 269	6.4	4.5	9 179	5.9	3.1	-0.97
190-4	9 311	4.2	2.9	9 137	3.3	2.2	-1.87
210-2	9 185	3.7	2.5	8 987	4.0	2.7	-2.16
210-3	9 248	3.6	2.6	8 927	5.7	3.8	-3.47
210-4	9 165	5.2	3.3	8 557	5.3	3.3	-6.63

从表 2、3 可知: 相同的热处理工艺条件下, 热处理对 MOR 的影响比对 MOE 的要大。

2.3 热处理温度与时间对顺纹抗压强度的影响

热处理前后的杉木顺纹抗压强度见表 4。从表 4 可知: 热处理杉木与未处理杉木相比, 顺纹抗压强度提高了。顾练百等^[1]也得出类似结论。顺纹抗

压强度随时间的变化规律并不明显, 但受热处理温度的影响较显著; 整体上, 随温度的升高, 顺纹抗压强度提高幅度减小。高温能使木材强度略有提高, 这主要是由于处理温度远低于起纵向支撑作用的纤维素大分子链的降解温度, 使热稳定性较差的半纤维素发生部分结构重组或降解, 木素发生部分软化。

尽管受热过程中木材的抗压强度会有所降低,但在冷却以及木材含水率平衡后,这种重组的结构反而

会对木材的抗压强度有增强效果^[14]。

表 4 热处理前后杉木的顺纹抗压强度

Tab. 4 Compressive strength parallel to the grain of heat-treated and untreated Chinese fir

处理 工艺	未处理			处理材			变化率 / %
	平均值 / MPa	变异系数 / %	准确指数 / %	平均值 / MPa	变异系数 / %	准确指数 / %	
170-2	33.8	5.4	2.9	39.2	4.2	2.3	15.98
170-3	35.3	4.0	2.0	40.1	3.6	1.9	13.60
170-4	35.1	5.1	2.6	41.8	4.1	2.1	19.09
190-2	34.2	4.3	2.1	37.2	3.0	1.4	8.77
190-3	34.2	6.0	3.2	37.4	4.5	2.1	9.36
190-4	33.1	3.0	1.5	36.0	4.1	2.0	8.76
210-2	33.4	2.5	1.2	36.6	4.3	2.3	9.58
210-3	33.6	4.1	2.2	35.9	4.3	1.9	6.85
210-4	33.6	2.9	2.4	35.8	2.6	1.3	6.55

2.4 热处理温度与时间对尺寸稳定性的影响

从表 5 可知:杉木热处理后的径向线湿胀率、弦向线湿胀率、体积湿胀率均低于未处理材的,弦向线湿胀率大于径向线湿胀率,并且在相同处理时间内,3 个指标均随温度的升高而降低;就整体而言,随时间的延长 3 个指标均降低,且受温度的影响较为显著,在 210℃ 时下降得较明显。

表 5 试材从绝干到气干的尺寸稳定性

Tab. 5 Dimensional stability of heat-treated and untreated Chinese fir from oven-dry to air-dry

处理 工艺	径向线湿 胀率 / %	弦向线湿 胀率 / %	体积湿 胀率 / %	ASE
未处理	1.65	3.64	5.50	
170-2	1.18	2.36	3.74	-32.02
170-3	1.16	2.50	3.65	-33.66
170-4	1.11	2.41	3.53	-35.85
190-2	1.14	2.32	3.60	-34.58
190-3	1.13	2.29	3.62	-34.21
190-4	1.05	2.28	3.49	-36.58
210-2	1.01	2.21	3.27	-40.57
210-3	0.93	2.09	3.13	-43.11
210-4	0.81	1.73	2.65	-51.81

从表 6 可知:杉木热处理后径向线湿胀率、弦向线湿胀率、体积湿胀率均低于未处理材的。可见,试材从绝干到吸水尺寸稳定的尺寸稳定性规律与从气干到绝干的相似。

比较表 5、6 可知:绝干材吸湿到气干时尺寸稳定性改善程度比到全湿状态时要好,因此与未处理木材相比,高温热处理木材在干燥环境中表现出的尺寸稳定性优于在高湿环境中的。杉木尺寸稳定性提高可能是因为木材细胞壁内的微胶粒和微细纤维在高温的过程中,不仅由于水分的排出而互相靠拢,也由于高温的作用而相对塑化固定。结构一旦发生变化就不易复原,以致于丧失了一定程度的吸湿能力,木材的尺寸稳定性相对提高^[17]。同时也由于热

作用使木材中—OH 相互结合脱出水分子而形成新的化学键,减少了木材中的极性基—OH,从而降低木材的吸水率,提高了尺寸稳定性^[18]。

表 6 试材从绝干到吸水尺寸稳定的尺寸稳定性

Tab. 6 Dimensional stability of heat-treated and untreated Chinese fir from oven-dry to the stage of dimensional stability in water absorption

处理 工艺	径向线湿 胀率 / %	弦向线湿 胀率 / %	体积湿 胀率 / %	ASE
未处理	2.88	6.85	10.43	
170-2	2.62	5.99	9.19	-11.89
170-3	2.53	5.81	8.61	-17.40
170-4	2.33	5.66	8.31	-20.32
190-2	2.22	5.60	8.21	-21.28
190-3	2.18	5.68	8.23	-21.09
190-4	2.19	5.76	8.16	-21.75
210-2	2.14	4.87	7.27	-30.32
210-3	1.74	4.80	6.96	-33.26
210-4	1.62	4.60	6.81	-34.70

3 结 论

1) 杉木经热处理后,随热处理温度升高和热处理时间延长,MOR 和 MOE 的降低幅度逐渐增大。在相同的热处理时间下,170、190℃ 时 MOR 和 MOE 变化率差异性较小,而 210℃ 时变化率突然增大;在相同热处理温度条件下,随时间的延长,二者变化并不大;热处理温度对 MOR 和 MOE 的影响比热处理时间更加显著;相同的处理工艺条件下,热处理对 MOR 的影响比对 MOE 的要大。热处理试材与未处理材相比顺纹抗压强度提高,顺纹抗压强度随时间的变化规律并不明显,但受热处理温度的影响较为显著;整体上,随温度的升高,顺纹抗压强度提高幅度减小。

2) 热处理提高了杉木的尺寸稳定性。热处理后,试材由绝干到气干和绝干到吸水尺寸稳定时 2

个阶段的径向线湿胀率、弦向线湿胀率、体积湿胀率均低于未处理材的,弦向线湿胀率大于径向线湿胀率;就整体而言,3个指标均随热处理温度升高和热处理时间延长而减小,且受温度的影响较为显著,在210℃时下降得较明显。ASE均为负值,ASE绝对值随热处理温度升高和热处理时间延长而增大,尺寸稳定性增强。与未处理木材相比,高温热处理木材在干燥环境中表现出的尺寸稳定性优于在高温环境中的。

参 考 文 献

- [1] 顾炼百,丁涛. 高温热处理木材的生产和应用[J]. 中国人造板, 2008, 9(1):14-15.
- [2] 周永东,姜笑梅,刘君良. 木材超高温热处理技术的研究及应用进展[J]. 木材工业, 2006, 20(5):1-3.
- [3] 李延军,孙会,鲍滨福,等. 国内外木材热处理技术研究进展及展望[J]. 浙江林业科技, 2008, 28(1):21-23.
- [4] VIITANEN H, JAMSA S, PAAJANEN L, et al. The effects of heat treatment on the properties of spruce [C]// *International research group on wood preservation* 25. Nusa Dua Bali: IRGWP, 1994: 1-4.
- [5] SINIM K, TONI A, PERTTI V. 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.
- [6] KAMDEN D P, PIZZI A, JERMANNAUD A. Durability of heat-treated wood[J]. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 2002, 60: 1-6.
- [7] NGUILA I G, PETRISSANM, GERARDIN P. Chemical reactivity of heat-treated wood [J]. *Wood Science and Technology*, 2007, 41: 157-168.
- [8] BOONSTRAM J, ACKER J, KEGEL E, et al. Optimization of a two-stage heat treatment process durability aspects [J]. *Wood Science and Technology*, 2007, 41: 31-57.
- [9] 曹永建,吕建雄. 国外木材热处理工艺进展及制品应用[J]. 林业科学, 2007, 43(2):104-110.
- [10] 李延军,唐荣强,鲍滨福,等. 高温热处理木材工艺的初步研究[J]. 林产工业, 2008, 35(2):16-18.
- [11] REM P C, VAN DER POEL H, RUYTER H P. Process for upgrading low-quality wood: Netherlands, EP0612595 [P]. 1994-08-31.
- [12] VIITANIEMI P, JAMSA S, EK P, et al. Method for improving biodegradation resistance and dimensional stability of cellulosic products:Finland, EPO 0695408 (A1) [P]. 1996-02-07.
- [13] VIITANIEMI P, JAMSA S. *Modification of wood with heat treatment* [R]. Espoo: VTT Building Technology, 1996.
- [14] 刘一星,赵广杰. 木质资源材料学[M]. 北京:中国林业出版社, 2004.
- [15] MITCHELL P H. Irreversible property changes of small loblolly pine specimens heated in air, nitrogen, or oxygen [J]. *Wood and Fiber Science*, 1988, 20(3):320-355.
- [16] TJEERDSMA B F, BOONSTR A M, PIZZI A, et al. Characterisation of thermally modified wood: Molecular reasons for wood performance improvement [J]. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 1998, 56(3):149-153.
- [17] 马世春. 汽蒸处理改善木材尺寸稳定性初探[J]. 木材工业, 1998, 12(5):36-39.
- [18] 刘培义,孟国忠. 木材的尺寸稳定性处理[J]. 木材工业, 2003, 17(2):42-45.

(责任编辑 李文军)