

研究与应用

水蒸气热处理对人工林杉木性质的影响

江京辉, 吕建雄, 周永东, 赵有科, 黄荣凤

(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: 对人工林杉木分别采用常压过热水蒸气、加压过热水蒸气以及饱和水蒸气进行热处理, 测试热处理材的尺寸稳定性、力学强度与颜色变化。结果表明, 常压过热水蒸气热处理材的颜色变化最小; 加压过热水蒸气热处理材的尺寸稳定性提高幅度最大, 力学强度降幅较低; 饱和水蒸气热处理材的端裂严重, 力学强度下降最多, 表面颜色变深。

关键词: 人工林; 杉木; 热处理; 水蒸气; 木材性质

中图分类号: S781.7; S791.27

文献标识码: A

文章编号: 1001-8654(2015)02-0013-04

Influence of Heat Treatment by Steam on Wood Properties of Chinese Fir from Plantations

JIANG Jing-hui, LV Jian-xiong, ZHOU Yong-dong, ZHAO You-ke, HUANG Rong-feng

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

Key Laboratory of State Forestry Administration, Beijing 100091, China)

Abstract: Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation lumber was treated with steam at atmospheric pressure, pressurized with super-heated steam and saturated water vapor, respectively. The dimensional stability, mechanical properties and color change of the treated samples were evaluated. The results showed that color changed the least for the samples treated with steam at atmospheric pressure, while the dimensional stability of the samples treated with pressurized super-heated steam had the greatest increase but the mechanical properties decreased. The samples treated with saturated water vapor, though, caused darkest color, the worst splits and the lowest strength.

Key words: plantations; Chinese fir; heat treatment; steam; wood properties

目前, 较成熟的木材热处理工艺有: 芬兰 Thermowood 热处理工艺、荷兰 Plato 热处理工艺、法国 Retification 热处理工艺、油热处理工艺和法国 Le Bois Perdure 工艺, 导热介质主要是水蒸气、惰性气体(氮气)、空气、热油或水, 不同的导热介质对处理工艺的影响各有利弊。

以空气作为导热介质时, 在高温下, 木材与空气中的氧气接触易燃烧, 存在一定的风险; 以植物油作为导热介质, 是应用于商业生产的一种新物质和新方法, 但处理设备及配套设施的投资昂贵, 处理技术复杂, 且植物油的消耗较大, 处理后木材的外观变差, 并且影响后续胶合涂饰性能; 以惰性气体为传热介质时, 需要良好的密封设备, 收集和制取较麻烦, 成本亦较高。因此, 从降低成本、保护环境、操作安全、节能降耗等方面综合考虑, 以水蒸气为导热介质的热处理工艺, 具有较强的应用推广性^[1]。

收稿日期: 2014-01-17; 修改日期: 2015-02-12

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划课题“家装材与室外材增值制造技术研究与示范”(2012BAD24B02)。

作者简介: 江京辉(1976—), 男, 中国林科院木材工业研究所副研究员, 博士。

水蒸气分为过热水蒸气和饱和水蒸气 2 种。

1) 过热水蒸气:根据热处理窑中存在压力与否,过热水蒸气热处理又分为:常压过热水蒸气热处理、加压过热水蒸气热处理和真空(负压)过热水蒸气热处理 3 种。

① 常压过热水蒸气热处理,随着热处理温度升高和时间的延长,热处理材的尺寸稳定性增强,颜色变化加剧,力学强度下降;但热处理对木材力学强度的影响规律不尽相同,若采用低温和短时间处理时,木材的力学强度可增加;但对于高温、长时间的处理,木材的力学强度呈现逐渐下降^[2]。

② 加压过热水蒸气热处理,通常压力小于 0.6 MPa,加压热处理木材的尺寸稳定性比常压热处理材更强,但颜色亦更深,强度降幅更大。在相同的热处理温度和时间下,随着压力的增加,处理材强度逐渐下降^[3-4]。

③ 真空(负压)过热水蒸气热处理,将木材置于真空条件下进行加热处理,无需特定的加热介质,设备投入成本相对较低,但由于传热速度较慢,难以实现工业化生产^[5]。

2) 饱和水蒸气热处理:生产应用较少,主要用于实验室研究热处理对木材微观构造的影响^[6]。

据此,笔者选择过热水蒸气(常压、加压)和饱和水蒸气等 3 种水蒸气,对人工林杉木木材进行热处理,以期为企业合理选择水蒸气热处理工艺,提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

杉木(*Cunninghamia lanceolata*),采自湖南常德,采集 5 株树木的树龄为 28~30 年,胸径为 30~35 cm。选取心材部分,制作规格为 1 000 mm(长)×50 mm(宽)×45 mm(厚)的试件 250 根,气干备用。

1.2 热处理工艺

1) 常压过热水蒸气热处理(Atmospheric pressure super-heated steam treatment, APT) 为了与饱和水蒸气热处理的最低温度 140 °C 进行比较,同时考虑设备的最高控制温度为 230 °C,设定 APT 工艺的温度范围为 140~220 °C,处理时间 0.5~4 h,氧气浓度 2%。

2) 加压过热水蒸气热处理(Pressurized super-heated steam Treatment, PT) 根据设备状况,选择最高压力条件 0.4 MPa;为了与 APT 处理进行比较,同时也为了避免重复试验(温度 140 °C、压力 0.4 MPa 时,PT 处理条件与饱和水蒸气热处理 ST 相同),最终确定温度范围为 160~220 °C。

3) 饱和水蒸气热处理(Saturated water vapor treatment, ST) 根据预试验结果,在 200 °C 处理 2 h 或在 180 °C 处理 4 h 时,试材均发生严重的开裂,强度损失很大。因此,设定 ST 热处理工艺为:时间 2 h,温度 140、160、180 °C,其对应压力分别为 0.40、0.60、0.98 MPa。

3 种热处理工艺参数见表 1,试件重复数为 30。

表 1 3 种水蒸气热处理工艺

Tab. 1 Parameters of heat treatments by steam

工艺类别	压力/MPa	温度/°C	时间/h
APT	0.10	140、160、180、200、220	4
PT	0.40	160、180、200、220	4
ST	0.40、0.60、0.98	140、160、180	2

1.3 性能测试

1) 参照 GB/T 1934.2-2009《木材湿胀测定方法》测试抗胀率(Anti-swelling efficiency, ASE),样本数为 15。

2) 参照 GB/T 1936.2-2009《木材抗弯弹性模量测定方法》、GB/T 1936.1-2009《木材抗弯强度试验方法》、GB/T 1935-2009《木材顺纹抗压强度试验方法》和 JIS Z 2101-2009《木材的试验方法》,分别测试抗弯弹性模量(MOE)、抗弯强度(MOR)、顺纹抗压强度(Compressive strength parallel to grain, CSPG)和表面硬度,样本数分别为 30、15、30 和 7。

3) 应用 CIE $L^*a^*b^*$ 系统表征木材颜色,其中 L^* 为明度指数, a^* 为红蓝色品指数和 b^* 是黄蓝色品指数, ΔE^* 为色差。样本数为 20。

2 结果与讨论

2.1 热处理木材的尺寸稳定性

三种水蒸气热处理工艺对杉木试样径向和弦向 ASE 的影响,如图 1 所示。随着热处理温度升高,热处理材的 ASE 逐渐增加,表明 3 种热处理工艺均可提高木材的尺寸稳定性。

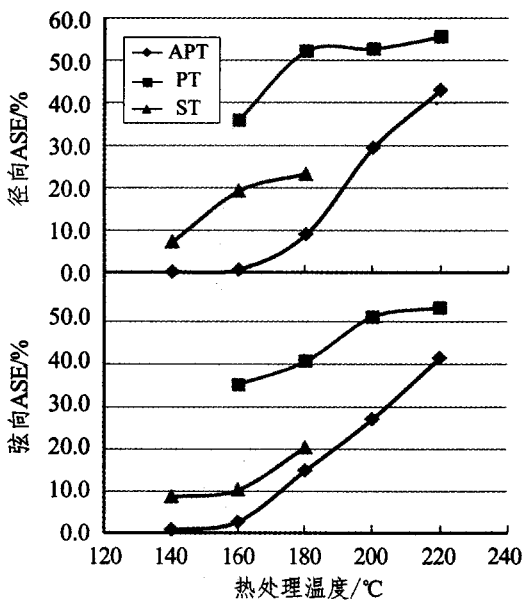


图 1 三种工艺热处理木材的径向和弦向抗胀率
Fig.1 Radial and tangential ASE of samples treated with three kinds of steam

1) APT 热处理材:由 5 种热处理温度的多重比较分析(表 2)可知,5 种温度之间存在显著性差异。其原因可能是,在常压 160℃时,木材半纤维素中的聚戊糖降解极少;180℃时聚戊糖降解增加,但纤维素未发生变化;200℃时,随处理时间延长,聚戊糖含量明显降低,纤维素稍有变化;220℃时,木材各组分含量发生了明显的变化^[7],导致热处理材的吸湿性降低,尺寸稳定性大幅提高。

表 2 不同温度下 APT 热处理材的径弦向 ASE 的多重比较
Tab.2 Radial and tangential ASE of samples treated by APT with different temperatures

温度/℃	径向 ASE/%				
	1	2	3	4	5
220	42.95				
200		29.34			
180			9.06		
160				0.88	
140					0.30

温度/℃	弦向 ASE/%				
	1	2	3	4	5
220	41.49				
200		27.03			
180			14.84		
160				2.85	
140					0.90

注:表中数字 1、2、3、4、5 代表 $p=0.05$ 不同子集,无显著差异的组在一个子集中;否则为不在一个子集中。下表同。

2) PT 热处理材:表 3 结果表明,在处理温度低于 180℃及超过 200℃时,热处理材弦向 ASE 的差异均不显著,但在 180 与 200℃之间差异显著;径向 ASE 的差异显现在 160 与 180、200 和 220℃之间,而后 3 个温度热处理材的径向 ASE 差异并不显著。

表 3 不同温度 PT 热处理材的径弦向 ASE 的多重比较
Tab.3 Radial and tangential ASE of samples treated by PT with different temperatures

温度/℃	径向 ASE/%		弦向 ASE/%	
	1	2	1	2
220	55.53		53.30	
200	52.68		51.10	
180	52.12			40.69
160		35.85		35.21

当热处理温度与时间均相同时,APT 与 PT 两种热处理材的 ASE 之间差异极显著,后者的 ASE 比前者增加 10%以上,表明 PT 热处理能更有效地提高木材的尺寸稳定,与已有研究结果相近^[4]。其原因可能是 PT 处理的介质相对湿度高,加剧了木材中半纤维素降解,使半纤维素中的游离羟基数量减少更多,从而使木材吸湿性降低更明显^[3-4]。

3) ST 热处理材:多重比较分析结果(表 4)表明,热处理材的径向和弦向 ASE 均存在显著性差异。

表 4 不同温度 ST 热处理材的径弦向 ASE 的多重比较
Tab.4 Radial and tangential ASE of samples treated by ST with different temperatures

温度/℃	径向 ASE/%			弦向 ASE/%		
	1	2	3	1	2	3
180	23.31			20.38		
160		19.25			10.34	
140			7.27			8.70

比较 3 种热处理工艺对试材径、弦向 ASE 的影响可知,在热处理温度相同时,3 种热处理工艺对提高杉木尺寸稳定性的效果依次为:PT、ST 和 APT。

2.2 热处理木材的力学性能

3 种热处理工艺对杉木木材力学性能的影响列于图 2。由图 2 可知,热处理材的 MOE、MOR、CSPG、径面硬度与弦面硬度,均低于对照材。

随着热处理温度的升高,APT 和 PT 热处理材的力学强度呈现先降、后升、再降的趋势,与已有研究结果相似^[8-11],原因可能是木材在较高温热处理条件下,纤维素准结晶区部分的分子重新排列组合而结晶

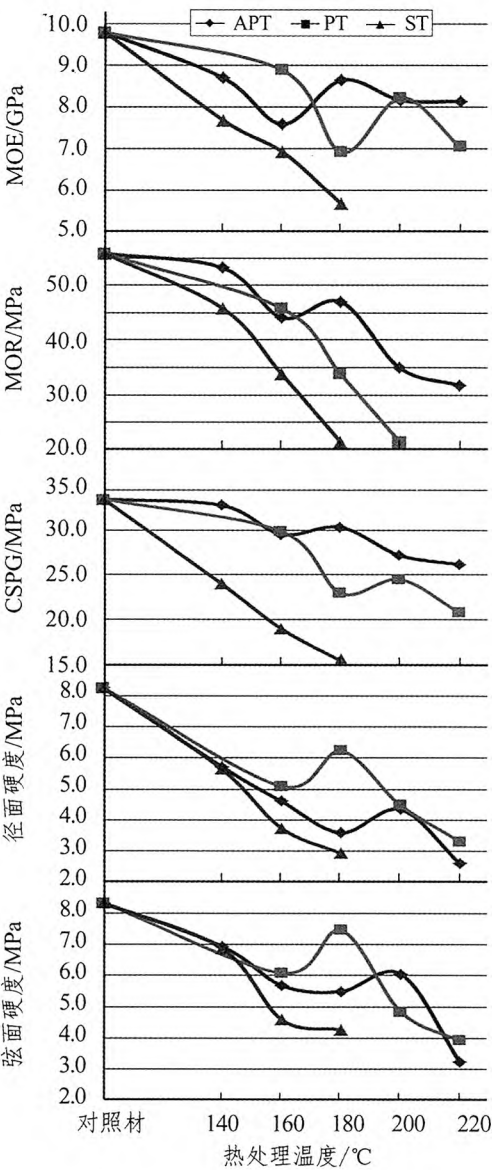


图2 三种工艺热处理木材的力学性能
Fig. 2 Mechanical properties of wood samples treated with three kinds of steam

化,半纤维素中的木聚糖与甘露聚糖在去除乙酰基后,也具有结晶化的能力^[12],因此,适宜温度的热处理可增加木材的结晶度,提高其强度。

ST 热处理材的几项力学性能指标均随温度升高而下降,主要是因为随着处理温度的升高,木聚糖、木质素和甘露聚糖等木材化学成分加速降解^[6]。

总体上,3 种工艺热处理材的强度损失排序为:ST>PT>APT。其原因与热处理介质相关。相同温度下,饱和水蒸气的密度大于过热水蒸气^[13],与木材反应更激烈,加剧木材降解。

2.3 热处理木材的颜色

如图 3 所示,随着热处理温度升高,热处理材的 ΔE^* 逐渐增加,其颜色逐渐加深。

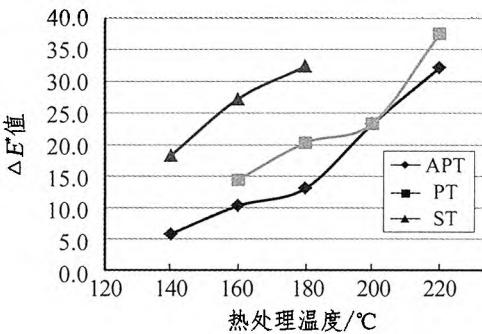


图3 三种工艺热处理木材的颜色
Fig. 3 Color change of wood samples treated with three kinds of steam

处理温度为 140 °C 时,ST 热处理材的 ΔE^* 明显大于 APT 热处理材;在 160 和 180 °C 时,三种工艺热处理材的 ΔE^* 差异极显著,其顺序为 ST>PT>APT;当超过 200 °C 后,APT 和 PT 热处理材的 ΔE^* 差异不显著,但 PT 热处理材的 ΔE^* 略大。

木材半纤维素、纤维素、木素发生剧烈热降解的温度范围分别为:180~300、240~400、280~550 °C。在常压下,当温度低于 180 °C 时,半纤维素降解极少^[14];而在 PT 或 ST 处理时,在密闭的环境中,木材降解产生的甲酸和乙酸等,将进一步加剧半纤维素的降解^[3-4],导致了木材的明度下降。

在 180 °C 时,ART、PT 的水蒸气压力分别为 0.1、0.4 MPa,远低于 ST 的饱和水蒸气压力 0.98 MPa,可能导致了 ST 热处理材的 ΔE^* 最大。

在 200 °C 以上时,高温作用加剧了杉木的热分解,木材中的抽提物也发生剧烈变化,生成更多酚类物质,导致颜色变化亦加剧^[15]。

3 结论

1) 3 种热处理工艺各有特点:APT 热处理材的颜色变化最小,力学强度下降亦较小;PT 热处理材的尺寸稳定性最好;ST 热处理材的颜色变化最大,力学强度下降最多。

2) 实际生产中,可根据热处理材的应用场合及对其强度、尺寸稳定性等性能和材色的要求,选择合适的热处理工艺。

(下转第 41 页)

3.1 加强废弃木材回收利用标准体系建设

贯彻落实《中华人民共和国循环经济促进法》，加快制定废弃木材回收利用标准发展规划，建立完善的木材回收利用标准体系，制定急需的技术标准和规范，使木材回收利用工作进入标准化轨道。

1) 加强废弃木材回收利用基础通用标准的制定，急需制定《废弃木材回收利用术语》、《废弃木材保管规程》、《回收木材取样和样品制备》、《回收木材检验方法》等标准；

2) 根据回收木材的具体用途，制定回收木材的加工规程、质量要求、抽样和检测方法等标准。急需制定《废弃木材加工技术规程》、《人造板生产用回收木材质量要求》、《生物质固体成型燃料用回收木材质量要求》等标准。

3) 对以回收木材为原料加工的产品(如人造板、生物质固体燃料等)，应制定其重金属和其他有害物质的限量指标标准。应跟踪研究国外先进标准，特别是相对比较完善的欧洲废弃木材回收利用技术标准和技术规范，为我国制修订标准提供参考。

针对化学处理木材含有氯、硫、重金属、防腐剂等化学污染物的问题，应结合我国的实际情况，对回收木材中化学污染物限量等关键技术指标及取样、检测方法进行研究。

3.2 抓紧现行标准的修订和整合

针对现行我国废弃木材回收利用标准的现状，应加强不同标准管理部门之间的合作，统一和规范废弃木材回收利用标准的术语、分类；对于含有防腐剂等有害物质的回收木材，应结合我国国情进行再利用的风险评估，以决定其可能的利用途径，增强标准的可操作性。

参考文献：

- [1] 黄荣凤, 鲍甫成, 黄小葵. 日本木材资源循环利用现状[J]. 世界林业研究, 2006, 19(4): 69-75.
- [2] Defra (Department for Environment Food and Rural Affairs). The Landfill Restrictions Team. Wood waste: A short review of recent research [R/OL]. https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/82571/consult-wood-waste-researchreview-20120731.pdf.
- [3] Howe J, Bowyer J, Pepke E, et al. Municipal solid waste (MSW) and construction and demolition (C&D) wood waste generation and recovery in the United States [R/OL]. http://www.dovetailinc.org/report_pdfs/2014/dovetailwoodrecovery0914.pdf.
- [4] 田宜水. 中国生物质固体成型燃料产业发展分析[J]. 农业工程技术(新能源产业), 2009(2): 13-17.
- [5] 胡孙跃, 杨凌云, 陈桂华. 循环经济与木材资源的循环利用[J]. 中国资源综合利用, 2006, 24(4): 32-34.

(责任编辑 向琴)

(上接第16页)

参考文献：

- [1] 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(5): 75-79.
- [2] 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): 1-6.
- [3] 涂登云, 王明俊, 顾炼百, 等. 超高温热处理对水曲柳板材尺寸稳定性的影响[J]. 南京林业大学学报, 2010, 34(3): 113-116.
- [4] Ding T, Gu L B, Li T. Influence of steam pressure on physical and mechanical properties of heat-treated Mongolian pine lumber [J]. Eur J Wood Prod, 2011, 69(1): 121-126.
- [5] 王雪花, 费本华, 蔡宇博, 等. 粗皮桉木材热处理位置对吸热量及升温速度的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2014, 31(5): 745-750.
- [6] Yin Y F, Berglund L, Salmen L. Effect of steam treatment on the properties of wood cell walls [J]. Biomacromolecules, 2011, 12(1): 194-202.
- [7] 邓邵平, 杨文斌, 饶久平, 等. 热处理对人工林杉木尺寸稳定性的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(07): 103-108.
- [8] 江京辉. 过热蒸汽处理柞木性质变化规律及机理研究[D]. 北

京: 中国林业科学研究院, 2013.

- [9] Cao Y J, Lu J X, Huang R F, et al. Effect of steam-heat treatment on mechanical properties of Chinese fir [J]. BioRes, 2012, 7(1): 1123-1133.
- [10] 吕建雄, 黄荣凤, 曹永建, 等. 蒸汽介质热处理对毛白杨木材颜色的影响[J]. 林业科学, 2012, 48(1): 126-130.
- [11] 刘星雨. 高温热处理木材的性能及分类方法探索[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
- [12] 丁涛, 贝政廷, 李源. 杉木热处理材结晶度及力学性能的研究[J]. 林业科技开发, 2012, 26(2): 23-26.
- [13] 刘战国, 周齐国. 饱和水蒸气密度与压力及密度与温度的经验公式推导[J]. 重庆建筑大学学报, 2000, 22(3): 118-121.
- [14] 唐荣强, 鲍滨福, 李延军. 热处理条件对杉木颜色变化的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2011, 28(3): 455-459.
- [15] Michiel J, Boonstra P, Boke Tjeerdsma. Chemical analysis of heat treated softwoods [J]. Holz als Roh-und Werkstoff, 2006, 64(3): 204-211.

(责任编辑 向琴)