

蒸汽热处理对桉木物理力学性能的影响^{*}

李腊梅 谢桂军 曹永建 李兴伟

(广东省森林培育与保护利用重点实验室 / 广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520)

摘要 为研究桉木制备实木地板的可行性, 以桉木为研究对象, 采用水蒸汽为加热介质, 分别在 150 ℃、170 ℃、190 ℃、200 ℃、210 ℃下热处理 1.5 h、3 h、4.5 h、6 h, 分析蒸汽热处理温度和时间对木材的干缩率、湿胀率和抗弯性能的影响。试验结果表明: 与素材相比, 蒸汽热处理后木材干缩率、湿胀率均不同幅度下降, 降幅分别在 0.7%~54.6%、1.1%~60.1% 区间, 尺寸稳定性得到明显改善; 同时, 热处理材的抗弯强度不同幅度下降, 降幅在 3.2%~59.4% 之间, 抗弯弹性模量有不同幅提高, 增幅在 7.0%~52.7% 之间。

关键词 蒸汽热处理; 桉木; 干缩率; 湿胀率; 抗弯性能

中图分类号: S784 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2022) 06-0074-07

Effect of Steam Heat Treatment on Physical and Mechanical Properties of Eucalyptus

LI Lamei XIE Guijun CAO Yongjian LI Xingwei

(Guangdong Provincial Key Laboratory or Silviculture, Protection and Utilization/Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China)

Abstract In order to study the feasibility of preparing solid wood flooring from fast-growing eucalyptus wood, this experiment took Eucalyptus wood as the research object and heat treated with steam at 150 ℃, 170 ℃, 190 ℃, 200 ℃ and 210 ℃ for 1.5 h, 3 h, 4.5 h and 6 h, respectively. The effects of steam heat treatment temperature and time on dry shrinkage, wet expansion and bending resistance of wood were analyzed. Compared with the untreated wood, the experimental results showed that the dry shrinkage and wet swelling of wood after steam heat treatment were decreased by different ranges, which were in the range of 0.7%-54.6% and 1.1%~60.1%, respectively, and the dimensional stability was improved. At the same time, the bending strength of heat-treated materials decreased by 3.2%-59.4% and the bending elastic modulus increased by 7.0%-52.7%.

Key words steam heat treatment; Eucalyptus; dry shrinkage; swelling rate; bending performance

桉树品种众多, 具有生长迅速、干形通直、成材率高、材质细等优点, 是世界上最重要的人工林树种之一, 也是我国南方地区人工林主要造林树种之一, 目前桉树产业在缓解我国木材供需矛盾、保证木材安全方面发挥了重要作用。但桉树生长周期较短且中龄、幼龄材居多, 存在易变

形、易开裂、较天然林有密度小、材质疏松等缺陷, 使得木材应用范围受限, 利用率低且利用方式单一。目前我国桉树木材多应用于制浆造纸和人造板(胶合板、纤维板、刨花板)领域, 附加值不高。人工林桉木经过改性后, 尺寸稳定性及物理力学性能得到改善, 可扩大其适用范围, 开

^{*} 基金项目: 广东省林业科技创新项目(2018KJCX006)。

第一作者: 李腊梅(1990—), 女, 工程师, 主要从事木质林产品检测研究, E-mail: lilamei_1204@163.com。

通信作者: 谢桂军(1980—), 男, 正高级工程师, 主要从事木材保护与改性研究, E-mail: xgj80@126.com。

发高出附加值的桉木产品。因此桉木高值化利用问题成为桉木加工利用的研究重要方向。

热处理是一种能有效改善木材材性且环保的物理改性方法，处理后的木材尺寸稳定性提高、颜色加深、耐腐蚀性和防虫效果增强。研究者在改良速生桉木材性方面做出许多研究。巫国富等^[1]对广西速生桉进行热处理研究，结果表明热处理木材的尺寸稳定性得到显著提高。曹永建等^[2-4]对尾叶桉 *Eucalyptus urophylla* 进行热处理发现，热处理后尾叶桉木材的颜色由原色逐步过渡到深色，热处理温度和时间均对木材颜色变化有显著影响，且热处理温度的影响比更为显著，此外一定处理温度和时间下尾叶桉的抗干缩性和抗湿胀性能最大提高了 68.24%、59.27%，尺寸稳定性明显改善。廖立等^[5]采用 185 ℃对尾赤桉 *E.urophylla*×*E.camaldulensis* 进行热处理，结果表明热处理提高了木材的尺寸稳定性、端面硬度和弹性模量，顺纹抗压强度和抗弯强度降低。上述一系列研究表明，热处理改性技术是改善桉木材性的可行性手段。由于桉木易变形、尺寸稳定性不佳、颜色偏浅等因素，在制备实木地板等高附加值木质产品上不具优势，为研究桉木制备实木地板的可行性，为充分利用丰富的桉树资源，热处理改性桉木的研究具有重要意义。

木材热处理方法主要有热油处理法、惰性气体处理方法和蒸汽处理方法 3 种。为综合评价热处理工艺对桉木材质性能的影响，为桉木在制备实木地板的关键工艺因子选择提供依据，本试验以我国南方地区主要速生树种桉木为研究对象，采用常压过热蒸汽高温热处理为改性手段，以木

材热处理温度和热处理时间为外部影响因子，研究蒸汽热处理对桉木材的物理力学性能、干缩性和湿胀性的影响，探索高附加值桉树木材产品的可行性，拓宽其应用领域。

1 材料与方法

1.1 热处理材料

桉树试材采集于海南儋州中国热带农业科学院试验场，品种为广西壮族自治区林业科学研究院培育的广 9 桉树 *Eucalyptus robusta*，2009 年栽种，树龄 13 年，胸径约 20 cm。

1.2 热处理设备

热处理设备采用蒸汽热处理罐（自制），适用于处理小批量木材。

1.3 热处理方法

蒸汽热处理主要流程如下：首先，桉木砍伐后锯切成 900 mm（长）×140 mm（宽）×25 mm（厚）的板材，并堆垛自然气干至含水率为 20% 以下，采用水蒸汽作为加热介质，放入热处理罐内进行热处理。热处理分为 3 个阶段：第一阶段，快速将蒸汽发生器中的水蒸汽升至 400 ℃，立即向热处理罐内通入水蒸汽；第二阶段，通过动态调节热处理罐内压力，使罐体内蒸汽温度在 20 min 内升至所需温度，当升到所要求的温度时开始保温，保温时间为 1.5~6 h；第三阶段，排气后开罐冷却，取出样品，常温环境中放置 24 h。

桉木热处理温度、时间组合处理条件如表 1，以未进行热处理的素材（CK）作为对照组。

1.4 材性检测方法

1.4.1 尺寸稳定性检测 本试验采用干缩性和湿

表 1 热处理工艺
Table1 Heat treatment process

组别 Group	热处理温度 /℃ Heat treatment temperature	热处理时间 /h Heat treatment time	组别 Group	热处理温度 /℃ Heat treatment temperature/℃	热处理时间 /h Heat treatment time	组别 Group	热处理温度 /℃ Heat treatment temperature	热处理时间 /h Heat treatment time
H1501	150	1.5	H1707	170	6.0	H2005	200	4.5
H1503	150	3.0	H1901	190	1.5	H2007	200	6.0
H1505	150	4.5	H1903	190	3.0	H2101	210	1.5
H1507	150	6.0	H1905	190	4.5	H2103	210	3.0
H1701	170	1.5	H1907	190	6.0	H2105	210	4.5
H1703	170	3.0	H2001	200	1.5	H2107	210	6.0
H1705	170	4.5	H2003	200	3.0	CK	—	—

胀性评价木材热处理前后的尺寸稳定性指标,按照国家标准 GB/T 1932—2009^[6]和 GB/T 1934.2—2009^[7]测试样品的弦向干缩性、径向干缩性和体积干缩性以及弦向湿胀性、径向湿胀性和体积湿胀性。

将木材制成 20 mm×20 mm×20 mm 的小试件,分成两小组,分别进行干缩性试验和湿胀性试验。

1.4.2 力学性能试验 用万能力学试验机,按照国家标准 GB/T 1936.1—2009^[8]、GB/T 1936.2—2009^[9]规定要求进行检测,将试件制成 300 mm (长)×20 mm (宽)×20 mm (厚)的规格备用。

2 结果与分析

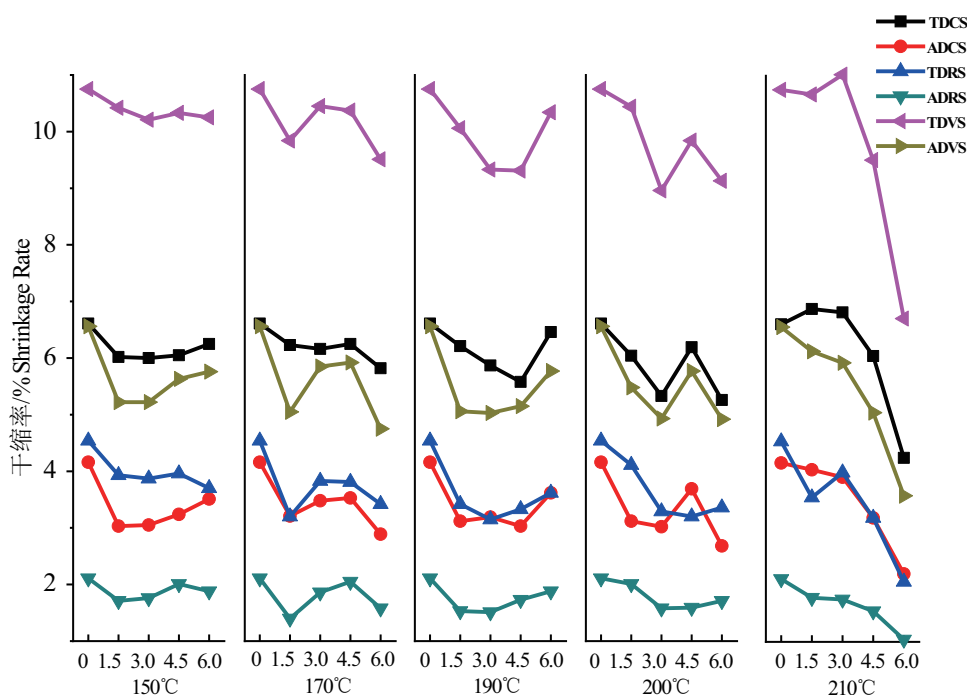
2.1 尺寸稳定性

2.1.1 干缩率 水蒸汽热处理前后木材干缩率的变化规律如图 1、图 2 所示,与 CK 相比,热处理后的木材弦向、径向干缩率和体积干缩率均呈现降低趋势,降低幅度范围在 0.7%~54.6%,抗干缩

性能得到明显增强。其中 TDCS、ADCS、TDRS、ADRS、TDVS、ADVS 最大降低幅度分别为 35.7%、47.1%、54.6%、50.7%、37.6%、45.4%,均出现在 H2107 组,即 210 °C 热处理 6 h。

图 1 中 5 组曲线显示:当热处理温度一定,干缩率随热处理时间延长呈现波动趋势,在 150 °C、170 °C、190 °C、200 °C、210 °C 时分别在 (1.5~3) h、(1.5~3) h、(1.5~4.5) h、(4.5~7)、7 h 时间范围内获得相对较低的干缩率。这说明,在较低温度时,短时间的热处理后木材内的水分挥发完毕,再延长热处理时间对木材的尺寸影响较小;而在较高温度时,由于木材的收缩不仅仅有水分挥发导致,还有部分有机组分挥发导致,因而热处理时间的延长对木材的尺寸影响更明显。图 2 中 4 组曲线表明:相同热处理时间下,干缩率随热处理温度升高呈现波动趋势。

2.1.2 湿胀率 水蒸汽热处理前后木材湿胀率的变化规律如图 3、图 4 所示,与 CK 相比,弦向、径向湿胀率和体积湿胀率均呈现降低趋势,降

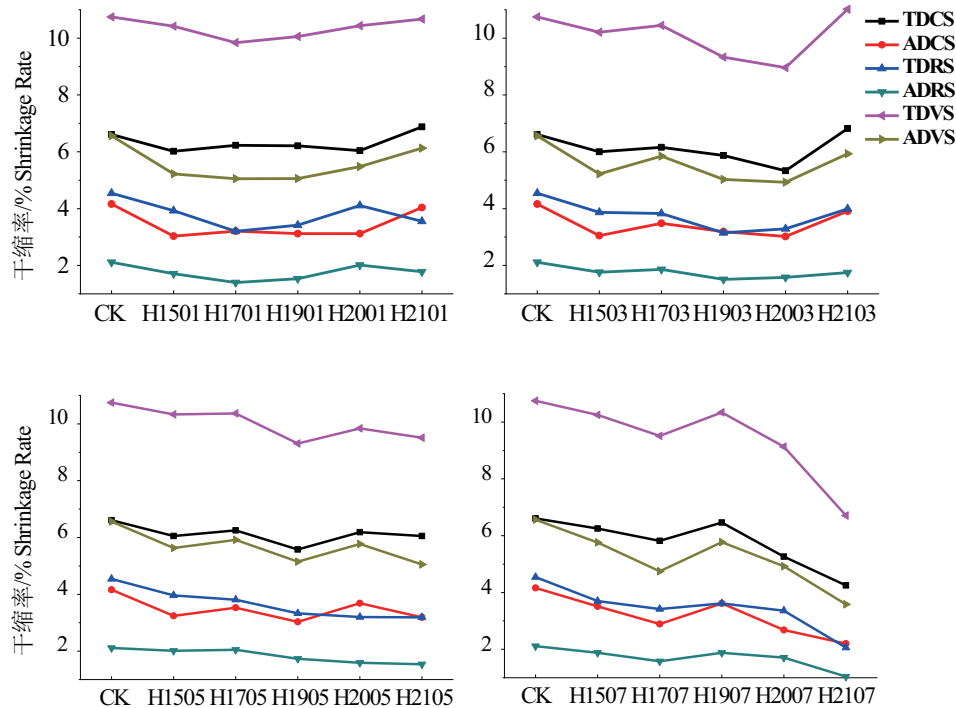


注: 0、1.5、3.0、4.5、6.0 为热处理时间 0、1.5、3.0、4.5、6.0 h。TDCS 为全干弦向干缩率, ADCS 为气干弦向干缩率; TDRS 为全干径向干缩率, ADRS 为气干径向干缩率; TDVS 为全干体积干缩, ADVS 为气干体积干缩率。

Note: the 0, 1.5, 3.0, 4.5 and 6.0 refer to the heat treatment time of 0, 1.5, 3.0, 4.5 and 6.0 h. TDCS is total dry chord shrinkage rate, and ADCS is air dry chord shrinkage rate. TDRS is total dry radial shrinkage rate, ADRS is air dry radial shrinkage rate. TDVS is total dry volume shrinkage, and ADVS is air dry volume shrinkage rate.

图 1 热处理时间对桉木干缩性的影响

Fig.1 Effect of heat treatment time on drying shrinkage of Eucalyptus



注：TDCS 为全干弦向干缩率，ADCS 为气干弦向干缩率；TDRS 为全干径向干缩率，ADRS 为气干径向干缩率；TDVS 为全干体积干缩，ADVS 为气干体积干缩率。

Note: TDCS is total dry chord shrinkage rate, and ADCS is air dry chord shrinkage rate. TDRS is total dry radial shrinkage rate, ADRS is air dry radial shrinkage rate. TDVS is total dry volume shrinkage, and ADVS is air dry volume shrinkage rate.

图 2 热处理温度对桉木干缩性的影响

Fig.2 Effect of heat treatment temperature on drying shrinkage of Eucalyptus

低幅度范围在 1.1%~60.1%，抗干湿胀性能得到明显增强。其中 CS1、CS2、RS1、RS2、VS1、VS2 降低最大幅度分别为 60.1%、47.3%、45.2%、51.5%、42.3%、49.1%，CS1 降低最大幅度出现在 H2005 组即 200 °C 热处理 4.5 h，其它均出现在 H2107 组，即 210 °C 热处理 6 h。

图 3 中 5 组曲线显示：在热处理温度一定时，湿胀率随热处理时间延长大体呈现减小趋势，个别出现小幅度上升趋势，在 150 °C、170 °C、190 °C、200 °C、210 °C 时分别在 (4.5) h、(4.5~7) h、(4.5) h、(4.5) h、(4.5~7) h 时间范围内可获得相对较低的湿胀率。

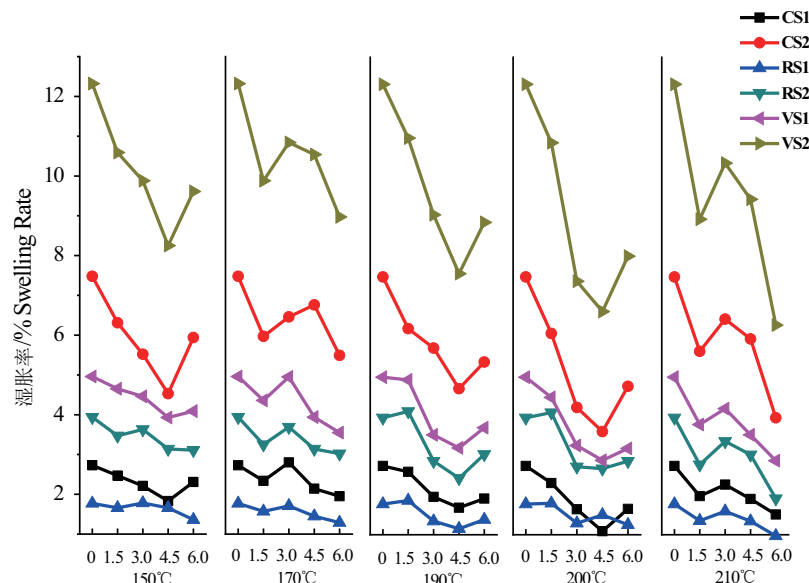
图 4 中 4 组曲线表明：相同热处理时间下，湿胀率随热处理温度升高呈现波动趋势。在温度区域比低温热处理木材的湿胀率要低，这是由于易受湿胀影响的木材内部细胞壁内纤丝、微纤丝线等成分热处理后受到了破坏，导致吸水后不能产生膨胀或收缩及木材内部半纤维素受热分解，

从而使热处理木材整体的湿胀率降低。

2.2 力学性能

水蒸汽热处理温度对桉木 MOR 和 MOR 的变化规律如图 5、图 6 所示。由图 5、图 6 可知，与 CK 相比，热处理后木材的 MOR 均有不同幅度减小，在 4 组不同处理时间下，随温度升高，MOR 降幅在 3.2%~59.4% 区间，其中 H2005 组的 MOR 降幅最大，达 59.4%，即温度为 200 °C、处理时间为 4.5 h；H1907 组的 MOR 降幅最小，为 3.2%，即温度为 190 °C、处理时间为 6 h，力学强度基本未受影响。热处理后木材的 MOE 除 H1501、H1905 有小幅减小外，其余组均不同幅度升高，增幅在 7.0%~52.7% 区间，其中 H1907 组的 MOE 提高最多，达 52.7%，即温度为 190 °C、处理时间为 6 h，而 H1501、H1905 有小幅减小，降幅分别为 1.2%、3.2%。

虽然桉木经高温热处理后力学性能有所降低，但与制备家具常用的人造板材料相比，力学性能

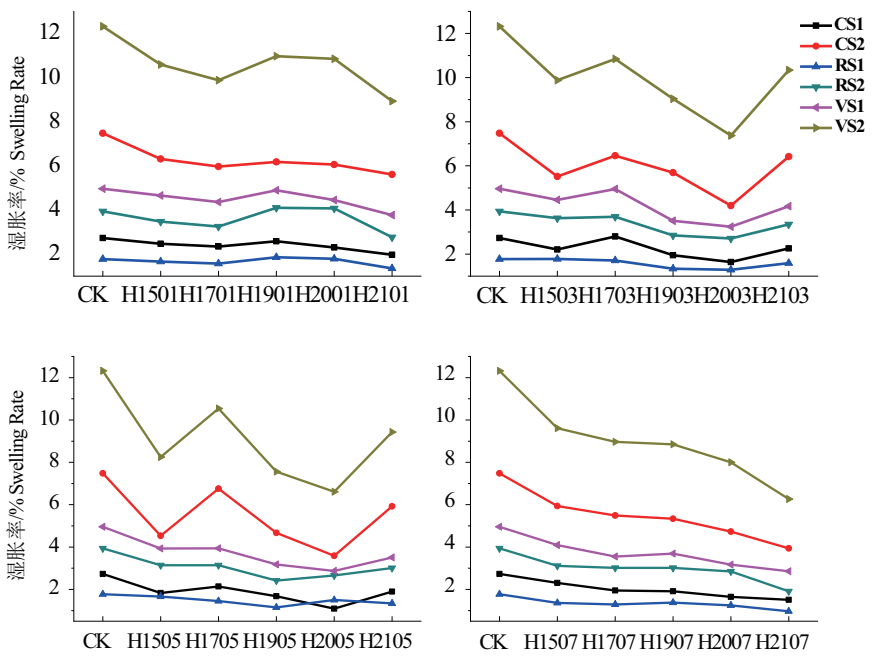


注：0、1.5、3.0、4.5、6.0 为热处理时间 0、1.5、3.0、4.5、6.0 h。CS1 为弦向湿胀率（全干→气干），CS2 为弦向湿胀率（全干→湿材）；RS1 为径向湿胀率（全干→气干），RS2 为径向湿胀率（全干→湿材）；VS1 为体积湿胀率（全干→气干），VS2 为体积湿胀率（全干→湿材）。

Note: the 0, 1.5, 3.0, 4.5 and 6.0 refer to the heat treatment time of 0, 1.5, 3.0, 4.5 and 6.0 h. CS1 is chord swelling rate (total dry to air dry), and CS2 is chord swelling rate (total dry to wet material). RS1 is radial swelling rate (total dry to air dry), RS2 is radial swelling rate (total dry to wet material). VS1 is volume swelling rate (total dry to air dry), VS2 is volume swelling rate (total dry to wet material).

图 3 热处理时间对桉木湿胀性的影响

Fig.3 Effect of heat treatment time on wet swelling of Eucalyptus



注：CS1 为弦向湿胀率（全干→气干），CS2 为弦向湿胀率（全干→湿材）；RS1 为径向湿胀率（全干→气干），RS2 为径向湿胀率（全干→湿材）；VS1 为体积湿胀率（全干→气干），VS2 为体积湿胀率（全干→湿材）。

Note: CS1 is chord swelling rate (total dry to air dry), and CS2 is chord swelling rate (total dry to wet material). RS1 is radial swelling rate (total dry to air dry), RS2 is radial swelling rate (total dry to wet material). VS1 is volume swelling rate (total dry to air dry), VS2 is volume swelling rate (total dry to wet material).

图 4 热处理温度对桉木湿胀性的影响

Fig.4 Effect of heat treatment temperature on wet swelling of Eucalyptus

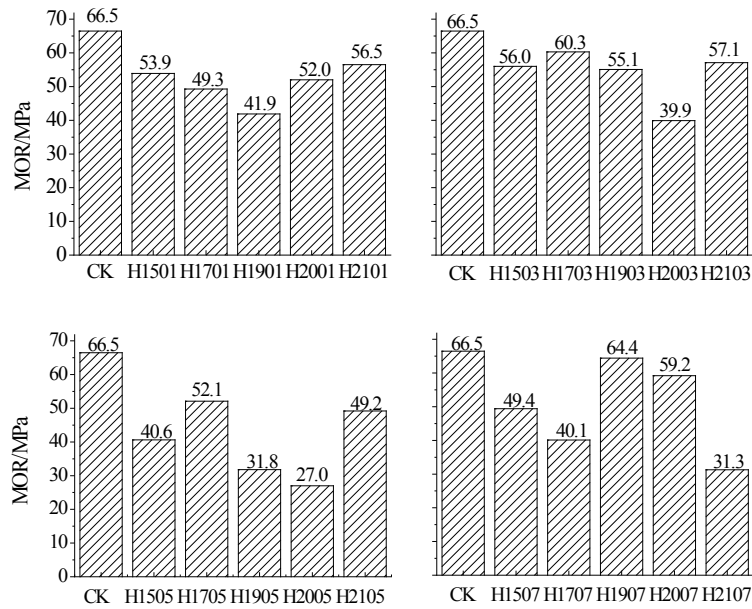


图 5 热处理温度对桉木 MOR 的影响

Fig.5 Effect of heat treatment temperature on MOR of Eucalyptus

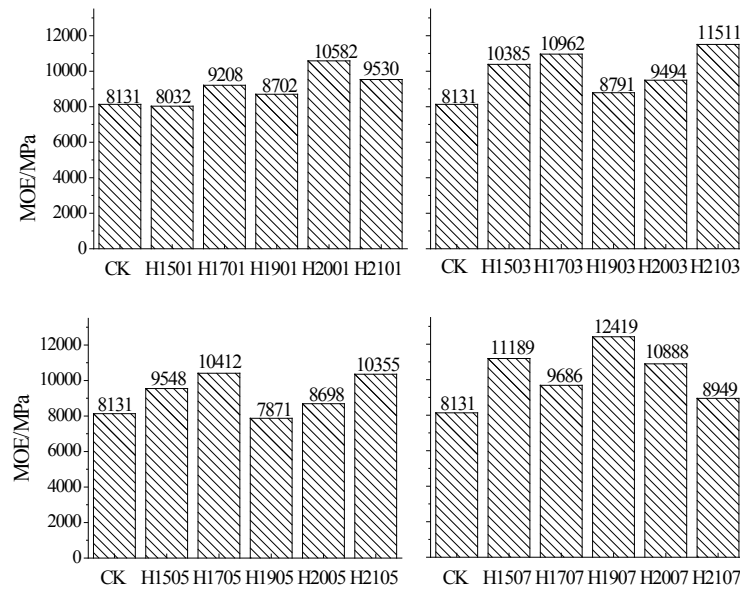


图 6 热处理温度对桉木 MOE 的影响

Fig.6 Effect of heat treatment temperature on MOE of Eucalyptus

仍具有较大的优势，可以根据不同使用要求来制定最合适的热处理工艺。

3 结论与讨论

蒸汽热处理可显著提高桉木的抗干缩性能和抗湿胀缩性能，改善木材的尺寸稳定性，其中热处理桉木的干缩率和湿胀率最大降幅分别可达 54.6% 和 60.1%，蒸汽处理温度和时间对桉木干缩率和湿胀率均有明显影响，且温度的影响更为显

著。热处理材尺寸稳定性提高是由于木材中的亲水性基团羟基 (-OH) 在热处理过程中发生化学交联缩合反应，生成新的憎水性物质，因此降低了木材的对水分的吸湿性，提高了木材的尺寸稳定性，此外木质素的降解也会导致木材湿胀性降低，这与丁涛等^[10]、王喆等^[11]的研究一致，研究指出木材在热处理过程中部分化学键发生断裂并伴随新化学键的形成，木材内部化学结构发生变化，因此对木材的吸湿和平衡起到了阻滞和延迟的作

用。

蒸汽热处理使桉木的抗弯强度有不同幅度降低, 抗弯弹性模量有不同幅度增加, 其中抗弯强度最大降幅为 59.4%, 抗弯弹性模量最大增幅为 52.7%, 个别温度处理的桉木抗弯弹性模量有 3% 左右降低。木材抗弯强度与木材纤维之间的横向联结密切相关, 它主要依靠纤维素与半纤维素的联结来实现。高温热处理使半纤维素发生降解, 破坏了半纤维素、纤维素与木素之间的联结, 减少了联结点数量, 断裂点增加, 使得胞间层劈裂^[12-14], 从而降低了木材抗弯强度。虽然桉木经高温热处理后力学性能有所降低, 但与制备家具常用的人造板材料相比, 力学性能仍具有较大的优势, 可用于家具、木地板、室内外建筑装饰材料等, 可以依据不同的使用要求选择不同的处理温度和时间。而且由于产地、品种等不同使得桉树自身材性各异, 针对不同种的桉树, 深入研究其热改性机理, 制定出更适合不同产品的桉树热处理工艺, 将有效推动桉树产业, 保障人工林桉树资源的健康发展。

参考文献

- [1] 巫国富, 韦春义, 曾俊钦, 等. 速生人工林桉树木材高温热处理研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(19): 44-48.
- [2] 曹永建, 李兴伟, 王颂, 等. 高温热处理对尾叶桉木材颜色的影响[J]. 林业与环境科学, 2018, 34(1): 18-20.
- [3] 曹永建, 李兴伟, 王剑菁, 等. 高温干燥处理对桉树木材抗干缩性能的影响研究[J]. 广东林业科技, 2015, 31(2): 78-83.
- [4] 曹永建, 王颂, 李怡欣, 等. 热处理对桉树木材抗湿胀性能的影响[J]. 林业与环境科学, 2017, 33(6): 20-23.
- [5] 廖立, 涂登云, 李重根, 等. 热处理对尾叶桉木材物理力学性能的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(5): 128-131.
- [6] 中国林业科学研究院木材工业研究所. 木材干缩性测定方法: GB/T 1932—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 1-3.
- [7] 中国林业科学研究院木材工业研究所. 木材湿胀性测定方法: GB/T 1934.2—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 1-2.
- [8] 中国林业科学研究院木材工业研究所. 木材抗弯强度试验方法: GB/T 1936.1—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 1-2.
- [9] 中国林业科学研究院木材工业研究所. 木材抗弯弹性模量测定方法: GB/T 1936.2—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 1-3.
- [10] 丁涛, 王长菊, 彭文文. 基于拉曼光谱分析的热处理松木吸湿机理研究[J]. 林业工程学报, 2016, 1(5): 15-19.
- [11] 王喆, 刘君良, 孙柏玲, 等. 真空热处理人工林落叶松木材吸湿性变化机理研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(10): 3160-3164.
- [12] 史蕾, 鲍甫成, 吕建雄, 等. 热处理温度对圆盘豆木材力学性能的影响[J]. 林业机械与木工设备, 2011, 39(1): 27-29.
- [13] 史蕾, 鲍甫成, 吕建雄, 等. 热处理对圆盘豆木材尺寸稳定性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(7): 24-28.
- [14] 李贤军, 蔡智勇, 傅峰, 等. 高温热处理对松木颜色和润湿性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(8): 178-182.