



## 木材热处理研究及产业化进展

顾炼百, 丁涛, 江宁

引用本文:

顾炼百, 丁涛, 江宁. 木材热处理研究及产业化进展[J]. 林业工程学报, 2019, 4(4): 1-11.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13360/j.issn.2096-1359.2019.04.001>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 基于拉曼光谱分析的热处理松木吸湿机理研究

A theoretical study of moisture sorption behavior of heat-treated pine wood using Raman spectroscopic analysis

林业工程学报. 2016, 1(5): 15-19 <https://doi.org/10.13360/j.issn.2096-1359.2016.05.003>

### 基于FT-IR和XPS的热处理白蜡木材色变化机理

Mechanism of color change of heat-treated white ash wood by means of FT-IR and XPS analyses

林业工程学报. 2017, 2(5): 25-30 <https://doi.org/10.13360/j.issn.2096-1359.2017.05.005>

### 二氧化硅联合热处理改性对橡胶木性能的影响

Effects of silicon dioxide combined heat treatment on properties of rubber wood

林业工程学报. 2019, 4(2): 38-42 <https://doi.org/10.13360/j.issn.2096-1359.2019.02.006>

### 热处理南洋楹木材的热重分析

Thermogravimetric analysis on heat-treated Albizzia falcata wood

林业工程学报. 2015, 29(5): 73-76 <https://doi.org/10.13360/j.issn.1000-8101.2015.05.019>

### 氮羟甲基树脂/蔗糖改性木材的耐候性能

Weathering performance of wood modified with an agent containing N-methylol resin/ sucrose

林业工程学报. 2019, 4(5): 60-69 <https://doi.org/10.13360/j.issn.2096-1359.2019.05.009>

# 木材热处理研究及产业化进展

顾炼百<sup>1</sup>, 丁涛<sup>1\*</sup>, 江宁<sup>2</sup>

(1.南京林业大学材料科学与工程学院,南京 210037; 2.江苏星楠干燥设备有限公司,南京 210037)

**摘要:**热处理是在 160 °C 以上低氧环境下进行的木材改性技术,可以改善木材的尺寸稳定性、生物耐久性和机械振动性能,同时能调节木材的材色,并且具有良好的环境友好性。但是高温处理也降低了木材的力学性能,对抗弯强度和冲击韧性的影响尤为显著。半纤维素在高温下的热解是热处理材改性的主要原因,它减少了木材中亲水基团和营养物质的数量,降低了木材的韧性,同时也影响了木材的明度指标。纤维素和木素在热处理过程中的变化相对较小,纤维素的结晶度有所上升,进一步降低了木材的亲水性,并提高了木材刚度;木素的结构在处理过程中发生了重组,形成了更加稳固的网状结构,对细胞壁的膨胀具有抑制作用,同时也是木材材色变化的主要原因。热处理过程中产生的抽提物主要是半纤维素的降解产物,它们对木材的吸湿性和声学特性都有影响。热处理对木材性能的调节受诸多工艺参数影响,温度是对木材改性深度影响最大的因子,处理环境的压力和最高处理温度下的处理时间也对改性效果产生影响。木材热处理目前已获得较为广泛的产业化应用,这一方面是得益于系统性的基础研究,另一方面是因为它具有环保、低成本、操作简便等优点。木材热处理目前已逐渐形成了一个较为完整的技术和理论体系,但在平衡性能提升与强度损失、保持材色稳定性等方面的研究仍具有持续深入和拓展的空间。

**关键词:**木材热处理;木材性能;改性机理;产业化应用

中图分类号:S784 文献标志码:A 文章编号:2096-1359(2019)04-0001-11

## Development of wood heat treatment research and industrialization

GU Lianbai<sup>1</sup>, DING Tao<sup>1\*</sup>, JIANG Ning<sup>2</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

2. Jiangsu Xinan Wood Drying Equipment Co. Ltd., Nanjing 210037, China)

**Abstract:** Wood heat treatment is a wood modification technology performed in an inert atmosphere at temperatures above 160 °C, which can significantly improve dimensional stability, biological durability and vibrational properties of wood. Besides, it can adjust wood color and modify wood environmentally friendly. However, wood mechanical properties, especially bending strength and impact strength are weakened by the high temperature. The degradation of hemicelluloses is the factor dominating the properties of heat-treated wood, which reduces the hydrophilic groups and nutrient substances in the wood; lowers wood toughness and influences its brightness index. Cellulose and lignin undergo less pronounced changes during the treatment. The increase of cellulose crystallinity makes wood more hydrophobic and rigid. A more rigid cross-linked structure of lignin was formed during the treatment, which not only prohibits the swelling of cell wall but also is the main reason for the color change of the heat-treated wood. The heat-induced extractives are mainly degradation products of hemicelluloses and may affect hygroscopicity and vibrational properties of the wood. The modification degree of the heat-treated wood is affected by various processing factors, among which, temperature ranks No.1 followed by the pressure of treatment environment and remaining time at the maximum temperature. The treatment temperature of 200 °C is an altering point for the properties of the treated wood, above which the dimensional stability and biological durability can be significantly improved with the cost of great strength loss. Wood heat treatment has been widely used in the wood industries, which is resulted from the systematic fundamental studies on the one hand, and due to its good environmental, economic and technological advantages on the other hand. Although the theories and technologies of wood heat treatment have been well established, there still exist many unknowns need to be further explored. One challenge is to balance the property improvement and strength loss so that the application of the heat-treated wood can be further broadened. Keeping the color of the treated wood stable is another work worthy of considering especially for those trying to use it as an alternative to tropical species. The treat-

收稿日期:2019-02-19

修回日期:2019-05-05

基金项目:江苏省政策引导类计划项目(SZ-SQ2017012)。

作者简介:顾炼百,男,教授,研究方向为木材干燥及热处理。通信作者:丁涛,男,副教授。E-mail: dtroy921@hotmail.com

ment equipment and its auxiliaries still have room to be updated to guarantee the long-term service of the system.

**Keywords:** wood heat treatment; wood property; property modification mechanism; commercial application

木材热处理也称木材热改性,欧盟标准(CEN/TS 15679: 2007)对热处理木材的定义为:在温度高于160℃的低氧环境下进行处理后,细胞壁构成和物理性能发生变化的木材。它表明了木材热处理的两个关键工艺条件:第1个是低氧环境,目的是避免木材因过度氧化而影响材性,同时防止木材燃烧引发的安全事故。降低处理环境氧含量的方法有很多,可以在处理环境中充满水蒸气或氮气等惰性气体,可以把木材浸在水或导热油中,也可以抽走处理罐中的部分空气造成低含氧量的负压环境,这些不同的隔氧方法也是区分不同热处理工艺的主要标准。热处理需要满足的第2个工艺条件是温度高于160℃。160℃是木材热处理过程中的一个重要节点,在此温度以下木材中以水分和抽提物挥发为主,当温度达到150~160℃区间时木材内部开始出现放热反应<sup>[1]</sup>,木材中的抽提物含量转而增加<sup>[2]</sup>,表明细胞壁组分开始发生热解,木材的物理性能由此发生变化。

热处理是产业化应用较为成功的一种木材改性技术,热处理木材产品目前广泛应用于建筑外墙板、户外景观、地板、家具及乐器等多种产品。木材通过热处理在功能上可提供更好的尺寸稳定性、生物耐久性、调节材色或改善声学性能,具有更为广泛的应用,为人工速生材、普通材,甚至疫材提供了一种有效的改性增值手段。笔者主要介绍热处理对木材材性的影响和影响热处理效果的主要工艺因子,讨论木材细胞壁组分在处理过程中的反应及其与材性变化之间的关联,简述木材热处理的产业化现状,并展望了木材热处理研究与应用前景。

## 1 热处理对木材性能的影响

### 1.1 吸湿性和尺寸稳定性

木材在热处理后吸湿性显著下降,吸湿滞后性更加显著<sup>[3-5]</sup>。随着环境湿度的增加,热处理材与未处理材吸湿性的差异不断增大,经190℃蒸汽处理的杨木(*Populus sp.*),在环境湿度由11.1%增至95.8%的过程中,平衡含水率与对照材的差值由0.71%逐步扩大至8.82%<sup>[6]</sup>,表明其在高湿环境下也能保持较好的稳定性。热处理后木材不仅吸湿量下降,吸湿模式也发生了变化。热处理材的水分扩散系数低于未处理材<sup>[7]</sup>,吸湿等温线也呈现出与普通木材相异的形状特征<sup>[8]</sup>。

近期研究发现,热处理材的吸湿性在经历交替变化的干湿周期后会有一定回升<sup>[9]</sup>,热处理环境的湿度水平对此有显著影响,低湿条件下处理的木材吸湿性恢复较为明显,而高湿条件下处理的木材则没有显著变化。因此有学者提出,可以将热处理材吸湿性的降低分为可逆和不可逆两部分,不可逆部分是由木材细胞壁组分在热处理过程中发生的热解反应造成的,而可逆部分则归因于木材细胞壁分子在高温作用下的重新排列及由此造成的可逆性微观结构变化<sup>[10-11]</sup>。

吸湿性的下降显著提高了热处理材的尺寸稳定性。杉木(*Cunninghamia lanceolata*)在230℃处理5h后心材和边材的尺寸稳定性分别提高了73%和71%<sup>[12]</sup>。不仅如此,木材径、弦向的干缩差异在热处理后也有所缩小,表现为热处理材的弦向抗胀系数大于径向抗胀系数<sup>[13-15]</sup>,使木材在宏观上表现出更为均匀的性质。

吸湿性的降低和稳定性的提高是热处理木材最基本和最重要的性能提升,热处理材的其他性能变化与吸湿性的改良都存在或多或少的关联。干缩湿胀是木材的固有特性,在这一过程中随着含水率的变化,木材外观尺寸和主要物理性能都会发生变化,这是造成木材应用缺陷的主要原因。热处理显著降低了木材的吸湿性,就是从根本上稳定了木材在应用过程中的综合性能表现。

### 1.2 生物耐久性

热处理可以显著改善木材的生物耐久性。耐久性的提高与处理温度水平显著相关,一般认为只有当处理温度高于200℃以后,热处理材的耐久性才会显著提高。在常压蒸汽处理条件下,当处理温度达到215℃时,木材的耐腐性可达到欧盟标准(CEN/TS 15083-1)的“耐腐”或“强耐腐”级别,但此时由于细胞壁组分的热解程度加深,木材的质量损失率可达20%<sup>[16]</sup>。在氮气或负压条件下的热处理试验也表明,只有当木材质量损失率达到12%以上时热处理材才表现出足够的耐久性<sup>[17-18]</sup>。

热处理材对真菌的抵御能力具有选择性。在培养基试验中,它对白腐菌和褐腐菌都表现出较好的抵御性,对蓝变菌的抵御能力也较强,但不能防止或减轻木材表面的霉变<sup>[19-20]</sup>,对白蚁的侵害也不具备防护能力<sup>[16,20]</sup>,且热处理材在土壤接触试验中的耐久性表现不如培养基试验<sup>[21]</sup>。



总体而言,热处理对木材耐久性的改进没有尺寸稳定性改善显著,在使用过程中需要避免与土壤的接触,并且这一改善是以牺牲力学强度为代价的,相关应用主要在非结构用产品上。

### 1.3 材色变化

材色变化是热处理对木材性能最直观的影响。热处理后木材明度下降,颜色加深,且随着处理温度的上升,材色变化也更加明显,部分木材显现出接近热带材的外观特征。对水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)热处理材的材色分析表明,热处理材在材色尤其是明度上接近名贵木材,其中 185 °C 工艺的处理材与柚木的材色十分接近<sup>[22]</sup>,因而热处理材也普遍被用来调节木材材色,以普通材种模拟珍贵材种的外观。在欧洲等发达国家市场,由于对进口热带材的合法性来源要求越来越严格,热带材的市场供应量显著下降,该类应用有逐步增多的趋势。材色调节的另一个用途是遮蔽木材原有的缺陷,这对疫材的利用具有重要价值。

热处理材与未处理材的色差指标  $\Delta E^*$  也可用于指示木材细胞壁组分在热处理过程中占比的变化<sup>[23]</sup>,继而可用于预测热处理材的改性程度。水曲柳和花旗松(*Pseudotsuga menziesii*)木材在 160, 190 和 210 °C 常压蒸汽条件下处理后材色与未处理材的对比见图 1。由图 1 可见,热处理显著加深了木材的材色,但是材色的变化与温度的上升并非呈线性相关,处理温度从 160 °C 升至 190 °C 时的材色变化显著小于 190 °C 到 210 °C 的材色变化,它暗示在第二个变迁过程中木材细胞壁组分经历了更剧烈的化学变化。200 °C 是木材热处理过程中的另一个重要温度转折点,热处理材材色的变化对这一转折作出了更直观的呈现。

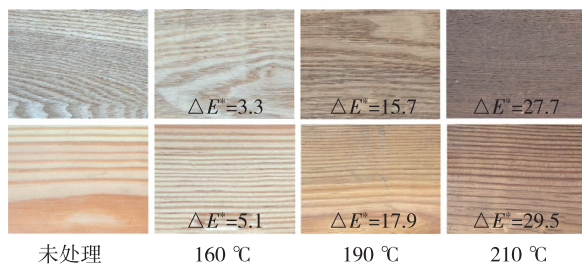


图 1 热处理对水曲柳(上)和花旗松(下)木材材色的影响  
Fig. 1 Influence of heat treatment on color of *Fraxinus mandshurica* (upper) and *Pseudotsuga menziesii* (lower)

与普通木材相似,热处理材的材色也会受使用环境的影响。在温度、湿度、光照和雨水等因素的作用下,木素含量逐渐下降,综纤维素成为细胞壁主导成分,表面材色逐渐变灰变白<sup>[24]</sup>。但与未处

理材相比,热处理木材较好地保持了表面质量,板材表面光滑,较少出现开裂等缺陷<sup>[25]</sup>。热处理材和未处理材的材色稳定性比较还没有统一结论。Ayadi 等<sup>[26]</sup>对白蜡木(*Fraxinus* sp.)、山毛榉、海岸松(*Pinus pinaster*)和杨木的紫外线(UV)光照试验表明,热处理材的材色稳定性优于未处理材。郭飞等<sup>[27]</sup>对龙脑香(*Dipterocarpus tubinatus* Gaertn)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)和杉木热处理材的氙灯照射试验也得到相同结论,同时发现涂饰添加 UV 吸收剂的改性聚氨酯(PU)漆可显著提高木材的光稳定性,但改性效果与材种密切相关。然而,Huang 等<sup>[25]</sup>对短叶松(*Pinus banksiana*)的光照试验却得出相反结论。George 等<sup>[28]</sup>认为热处理材的材色稳定性与材种相关,针叶材的材色稳定性优于阔叶材。

### 1.4 力学强度

在热处理过程中由于木材细胞壁组分发生降解或重组,力学性能指标会发生变化,其中抗弯强度(MOR)受热处理影响较大,尽管部分研究发现当热处理温度较低或处理时间较短时 MOR 值会略有上升<sup>[29-31]</sup>,但总体而言 MOR 随着处理程度的加深而不断下降。对白杨(*Populus tomentosa*)木的热处理试验表明:在 200 °C、3 h 的条件下处理后,木材的 MOR 值下降了 29%;当处理条件加深到 230 °C、5 h 时,MOR 降幅可达 54%<sup>[31]</sup>,此时木材已完全无法用于任何承重结构。冲击韧性也是受热处理影响显著的力学性能指标,在热处理后出现明显下降<sup>[32]</sup>,它表明热处理显著降低了木材的韧性,使材质变脆<sup>[29]</sup>。

相比而言,热处理对其他力学性能的影响较为复杂。木材表面硬度没有发生明显变化,甚至略有上升。多数研究认为,温和的处理条件会提高木材的 MOE,使木材具有更高的刚性<sup>[1,30,33]</sup>。木材的顺纹抗压强度在热处理后也会有所上升<sup>[34]</sup>。

上述研究表明,通过对热处理工艺的精确控制,可以将热处理材的力学性能损失降到最低,甚至某些指标还可能有所上升。但无论热处理材的力学性能指标开始如何变化,当处理温度超过 200 °C 以后力学性能指标总体呈快速下降趋势,此时由于木材的强度损失过大,加工和使用性能显著恶化。

### 1.5 声学性能

木材在长期使用后会经历自然“老化”过程,声学性能获得改善,表现为木材的比动态弹性模量上升,损耗因子下降,木材机械振动的传播性能获得提高<sup>[35]</sup>。热处理可以起到类似天然“老化”的

效果,改善木材的声学性能指标<sup>[11,36]</sup>,同时缩短正常“老化”所需要的漫长周期。该类热处理的温度水平相对较低,一般在 160 °C 左右,因为在这个温度水平下木材的声学性能和机械力学性能之间可达到一个较好的平衡<sup>[37]</sup>。该类热处理对环境湿度也有一定要求,在 60%~75%的相对湿度条件下改性效果较佳,更高的环境湿度反而会显著降低木材的声学品质<sup>[11,38]</sup>。

热处理材在乐器上的应用不仅限于发声的音板,由于具有出色的尺寸稳定性、对材色的调节能力以及部分力学性能的提升,其应用也包括其他具有装饰、封闭甚至受力功能的乐器构件,如吉他的指板、边板和背板等<sup>[37,39]</sup>。

### 1.6 加工性能

木材经过热处理后韧性下降,脆性增加,这对其加工性能具有显著影响,在切削过程中易产生局部劈裂,产生崩边等边缘加工缺陷,切削过程中产生的粉尘也更为细小<sup>[40]</sup>。就切削表面质量而言,热处理使木材的表面粗糙度较未处理材略有下降<sup>[41]</sup>,但也有研究表明两者并不存在统计上的差异<sup>[42]</sup>。

虽然水润湿性试验显示热处理材表面的润湿性低于未处理材<sup>[2]</sup>,暗示热处理材的界面性能低于未处理材,但热处理材的涂饰与胶合的实际性能表现,更取决于所应用的基材和涂料类型。涂饰试验表明,涂料对热处理材表面的渗透与未处理材没有显著区别,漆膜附着力也因基材或涂料的不同而有差异<sup>[43]</sup>。对桦木(*Betula platyphylla*)、樟子松和

落叶松(*Larix gmelinii*)热处理材的胶合试验表明,室内用白乳胶和室外用 PU 胶都能与热处理材很好胶合,胶合试件的浸渍剥离率和煮沸剥离率都为 0%<sup>[44]</sup>。

### 1.7 环境属性

热处理由于无需添加任何化学药剂一直被视为一种环境友好的木材改性方法。基于生命周期的环境影响评价表明,由于使用寿命的延长,采用 Thermowood 工艺(表 1)的热处理材外墙挂板的环境友好性优于未经处理的外墙挂板<sup>[45]</sup>,与其他建材相比,热处理材挂板在气候变化和人体健康两类环境指标具有潜在优势<sup>[46]</sup>。采用 Retification 工艺(表 1)的热处理木材可满足地板产品的有机挥发物(VOCs)室内释放标准<sup>[47]</sup>。欧洲赤松热处理材的 VOCs 排放水平仅为气干材的 1/9~1/7,主要成分为醛类和羧酸<sup>[48]</sup>,其中糠醛的释放是热处理材特征性气味的主要来源<sup>[49]</sup>。

热处理对环境的影响主要体现在处理过程中。由于木材细胞壁组分,特别是半纤维素的降解,在处理过程中存在一定量 VOCs 的排放,主要成分为乙酸和甲酸等有机酸,同时也包括少量的苯酚和糠醛等物质,其中乙酸含量最高,可达排放总量的 75%左右<sup>[47,50]</sup>。酸性物质的排放对热处理兼具环境和工艺两方面的影响,它一方面对生产排气净化和处理窑壳体密闭性提出了一定要求;另一方面,由于酸性物质可以促进木材组分在高温下的水解<sup>[51]</sup>,因而调节处理环境的酸性也是控制木材的热改性水平的一个手段。

表 1 木材热处理主要工艺类别及技术参数

Table 1 Main wood heat treatment technologies and their technical parameters

热处理类型	工艺名称	介质	温度/°C	周期/h	窑容积/m <sup>3</sup>
常压	ThermoWood	水蒸气	185~215	36~72	10~150
	Perdure	水蒸气	200~240	12~18	10
	Thermoholz	水蒸气	160~220	50~90	34,54
	MENZ HOLZ	植物油	210~220	20~40	15
	Retification	氮气	210~240	>24	4~20
加压	WTT	水蒸气	140~210	12~24	6~23
	Moldup	水蒸气	160~230	6~10	2~20
负压	Thermovuoto	空气	190~230	-	25
	Vacu	空气	170~230	-	-
组合	Plato	水	150~180	84~108	20
		水蒸气	150~190		80

## 2 木材热处理的工艺参数

### 2.1 温度

温度是影响木材热改性程度的第一工艺参数。

热处理材的概念是通过温度来定义的,160 °C 是热处理的起始温度(CEN/TS 15679;2007)。但就处理效果而言,温度一般需达到 180 °C 左右才可实现较为充分的改性效果。200 °C 是热处理的一个转

折点,由于超过这个温度后纤维素开始发生降解,木材的降解水平显著提高,强度指标降幅加大<sup>[1,30]</sup>。当处理温度进一步增加到240℃时,木材中的抽提物含量转而出现下降<sup>[52]</sup>,暗示热处理温度水平下主要降解反应的结束和降解产物的挥发。化学分析表明,在这一温度水平下,木材内的半乳糖、木糖、甘露糖等只剩下少量剩余,表明半纤维素已充分分解<sup>[53]</sup>,此时若再提高处理温度木材将丧失多数应用价值,因而这一温度水平也是多数木材热处理的上限温度。

## 2.2 压力

一些热处理工艺在加压条件下完成,压力可促进木材内部化学组分的降解<sup>[54]</sup>,降低热降解的起始温度<sup>[55]</sup>,使热处理实现比相同温度水平常压条件下更显著的性能变化<sup>[32,56]</sup>。在工艺上,这意味着更低的处理能耗和更短的处理周期。此外,高湿环境还提高了处理材的终了含水率,有助于缩短处理后的调湿时间<sup>[57]</sup>。木材热处理也可以在负压环境中完成,压力范围一般为 $0.15 \times 10^5 \sim 0.35 \times 10^5$  Pa,负压热处理通过抽气产生惰性处理环境,无需额外的保护气,木材降解过程中产生的酸性有机气体被排出装置,使处理条件更加温和,降低了热处理对木材力学性能的影响<sup>[58]</sup>,并减少了对处理装置的腐蚀,有助于消除处理材的气味。但是,由于失去了有机挥发物对热解的催化作用,负压热处理的温度一般略高于其他热处理技术(见表1)。

压力水平对热处理的影响本质上是改变了处理环境中的酸性挥发物浓度。高压环境对木材热解的促进作用,主要是由于木材在热处理过程中释放出的酸性挥发物无法排出处理系统而增加了处理环境的酸性,对木材中半纤维素的降解起到了促进作用,而负压环境则正好相反。高压和负压环境给予热处理不同于常压条件的工艺和产品特性,但由于对处理环境的密闭性要求很高,因而单个系统的处理能力都较为有限,在应用规模上都无法与常压处理工艺相比。

## 2.3 处理时间

延长在最高热处理温度下的处理时间可以达到与提升处理温度相似的效果。Guo等<sup>[31]</sup>的试验表明,200℃下处理3h与215℃下处理1h对木材材性的影响相似。Yildiza等<sup>[59]</sup>认为温度水平对处理材力学性能的影响大于处理时间。Johansson等<sup>[60]</sup>通过模型预测表明,就处理效果而言处理温度每降低1℃,需要延长50min热处理时间来补偿。虽然模型预测与实际试验结果有偏差,但仍说

明温度水平对热处理结果的影响大于处理时间。

## 3 热处理的改性机理

### 3.1 半纤维素

半纤维素是由戊糖和己糖单元构成的带有支链的聚合物,它一方面与木素通过酯键和醚键相连,另一方面与纤维素通过氢键相连,是细胞壁纤维素骨架和木素填充物质之间的黏结物质<sup>[61]</sup>。半纤维素是受热处理影响最显著的木材化学组分。当温度达到150~160℃时半纤维素就开始降解,半纤维素分子链中的乙酰基首先从主链中断裂形成乙酸,葡萄糖醛酸聚木糖分子上还有少量羧基也发生断裂,生成甲酸,两者是木材热处理过程中的主要挥发物,它们形成的酸性环境对半纤维素的水解具有加速作用。针叶材和阔叶材半纤维素在构成上有显著差异,针叶材以半乳葡甘露聚糖为主,其主链上平均每3~4个己糖单元才有1个乙酰基,而阔叶材则以葡萄糖醛酸聚木糖为主,平均每10个木糖单元具有7个乙酰基<sup>[62]</sup>,因而在相同处理温度下阔叶材降解程度更深,适用的热处理温度一般低于针叶材。

随着处理温度的上升,半纤维素分子的聚合度不断降低,生成低聚糖甚至单糖,单糖分子通过脱水反应生成醛类物质,其中戊糖反应生成糠醛,而己糖则反应生成羟甲基糠醛<sup>[53,63]</sup>。在180℃饱和蒸汽处理条件下,半纤维素中的阿拉伯糖和半乳糖可完全分解<sup>[64]</sup>。

半纤维素在热处理过程中的变化是形成热处理材特有材性的决定性因素。半纤维中的游离羟基是木材中的主要亲水基团,半纤维素的降解使水分子与木材的结合点显著减少,是木材吸湿性降低的主要原因。吸湿性的降低也减少了真菌生长所需的水分。半纤维素作为营养物质,自身的降解减少了真菌在腐蚀初期生长所必需的能量与代谢物,降解生成的糠醛等产物可能分布在木素表面,阻碍了真菌的酶系统对被酶作用物的识别<sup>[65]</sup>。Hakkou等<sup>[52]</sup>的试验表明,热处理材的防腐性能与木材降解程度高度相关,由于半纤维素是木材热处理过程中细胞壁的主要降解组分,因而说明半纤维素在增加木材防腐性能方面发挥着重要作用。

半纤维素存在于细胞壁骨架和填充物质之间,由于木材中的亲水基团主要在半纤维素分子链上,使得该界面区域存在大量水分,它们增加了半纤维素分子的流动性,同时自身也起到润滑剂的作用,使纤维素骨架与半纤维素之间可产生相对滑移,在



受力时起到传递应力并将部分应变能量转化为热能的作用,使木材具有一定韧性<sup>[66]</sup>。热处理后半纤维素含量的下降破坏了这一机制,降低了木材传递和转化应力的能力,使其脆性增加。从木材强度和加工性能角度考虑这是一种不利的变化,但从声学性能方面考虑,机械能向热能的转化恰是声振动中的损耗,因而半纤维素含量的适度下降有利于机械振动的有效传播,可提高木材的声学性能。

半纤维素对热处理材的材色也有影响,半纤维素本身并不吸收可见光,但它的降解产物,特别是戊糖含量的下降是热处理材明度下降的主因<sup>[67]</sup>。

### 3.2 纤维素

纤维素是由葡萄糖单元构成的长分子链,具有部分晶体结构,是木材细胞壁的骨架物质。有序的晶体结构提高了纤维素的热稳定性,使其在热解反应中基本保持稳定。由于半纤维素在高温下发生了降解,以及纤维素准结晶区的部分分子重新排列而结晶化,热处理后纤维素的结晶度有所上升<sup>[68-70]</sup>。纤维素结晶度的增加是热处理材吸湿性降低的另一个重要原因。纤维素虽然分子链上富含羟基,但约有2/3的羟基在纤维素分子链内或分子间通过氢键连接,只有无定形区和结晶区表面的羟基才能与水结合<sup>[62]</sup>,结晶度的增加使纤维素中可与水进行结合的吸着点数量进一步减少,降低了木材的吸湿性。

纤维素微纤丝在热处理过程中也可能因半纤维素组分的降解而相互聚集,聚合后的微纤丝断面尺寸更大,具有更高的刚性,这是热处理材在温和处理条件下部分力学性能提高的主要原因。微纤丝断面尺寸的增大也使水分子渗透的难度加大,使热处理材的亲水性进一步降低<sup>[71]</sup>。但是当热处理温度超过200℃时纤维素也开始发生降解,在220℃其降解水平显著提高<sup>[72-73]</sup>;纤维素的降解产物主要为左旋葡萄糖,并最终转化为呋喃衍生物<sup>[50]</sup>。这是造成热处理材力学强度在处理温度超过200℃后大幅下降的主要原因。

### 3.3 木素

木素是木材中热稳定性最高的化学组分,在热处理过程中木素基本没有降解,因而在木材中的相对含量有所上升<sup>[18,74]</sup>。由于木素对纤维素微纤丝起包裹作用,可增强其承受压缩载荷的能力,因而木素含量的增加有助于提高热处理材的顺纹抗压强度。

木素虽然没有显著降解,但其结构在热处理过程中发生了重组。木素的部分化学键,特别是芳香

基醚键会发生断裂,生成自由酚羟基与 $\alpha$ 或 $\beta$ 羰基。木素的愈创木基丙烷间C5与C3由于甲氧基的断裂而直接以C—C键相联发生缩合反应<sup>[71]</sup>。部分研究认为木素苯环间以亚甲基相联进行缩合<sup>[75]</sup>,形成了更加稳固的网状结构,整体刚性进一步加强,对细胞壁的膨胀具有抑制作用,是热处理材吸湿性下降的原因之一。通过亚甲基相联形成的二苯甲烷结构也极大地影响了木素的颜色,并容易被氧化而产生显色的苯醌和亚甲基苯醌等中间产物<sup>[76]</sup>。

### 3.4 抽提物

木材中的抽提物具有抗氧化性能,有助于保持木材的材色<sup>[26]</sup>。在热处理过程中木材中的抽提物在高温的作用下挥发或流失,是导致木材材色变化的原因之一。

对热处理材的化学分析表明,热处理材的极性和非极性抽提物含量都高于未处理材<sup>[72]</sup>,这些抽提物是细胞壁组分的热解产物在木材中的残留,主要是半纤维素降解过程中产生的低分子量糖类化合物,它们堵塞或填充了木材细胞壁中的微孔。由于糖分只在高湿条件下才吸收水分,因而它们的存在降低了水分对木材的渗透性,有助于进一步降低热处理材的吸湿性<sup>[64]</sup>,但是对这一机制的作用大小目前还没有统一结论<sup>[10,38]</sup>。一些研究认为,新生成的水溶性抽提物同时还起到了细胞壁增韧剂的作用,可提高木材的损耗因子<sup>[38]</sup>,因此以声学改良为目的的热改性处理必须精确控制木材化学组分的反应程度,过度的降解反应反而有损木材的声学性能。

木材在热处理过程中产生了少量有毒化合物。Kamdern等<sup>[77]</sup>在热处理材的抽提物中发现一些有毒多环芳香族化合物,认为这可能是热改性材耐久性提高的原因之一。Boonstra等<sup>[78]</sup>也在热处理辐射松中发现多种酚类化合物,其中香兰素因能阻碍酶的合成而对真菌的生长有抑制作用。但是一些比较试验发现,经过抽提和未经抽提的热处理材在防腐性上差别并不显著<sup>[52]</sup>,表明对热处理过程中生成的抽提物在提高木材防腐性方面的作用尚需进一步确认。

热处理过程中木材细胞壁组分的变化及其与材料变化的对应关系见图2。

### 3.5 微观结构

热处理对木材细胞的形态和尺寸都会产生影响,高温作用使细胞间逐渐产生分离<sup>[64,79-80]</sup>,细胞的尺寸和形态也发生变化。对桦木的热处理试验表明:纤维的尺寸、截面面积和细胞壁厚在处理后的

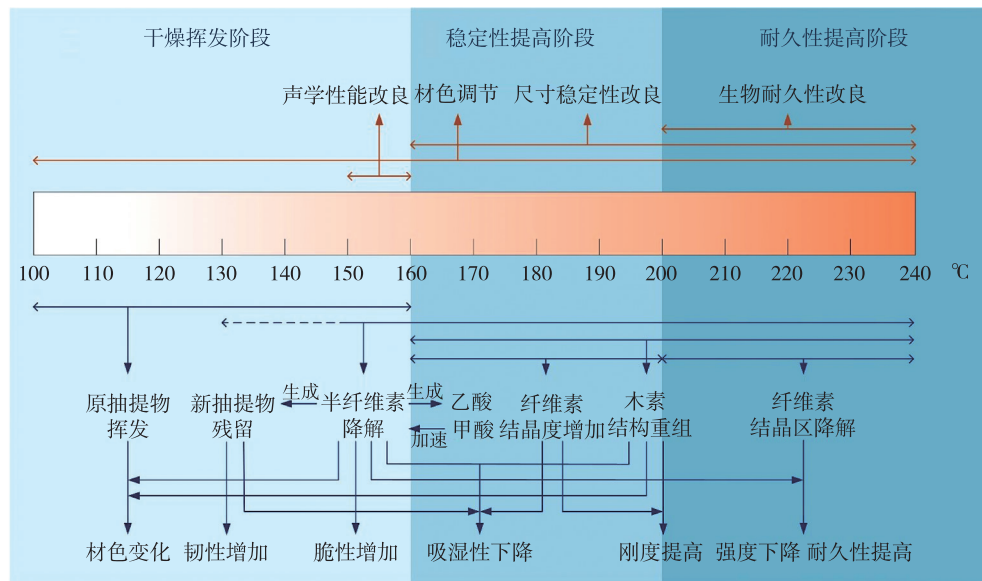


图2 木材热处理过程细胞壁组分变化及其对材性的影响

Fig. 2 Changes of wood cell wall components during heat treatment and the induced property changes

都会降低,断面形态则由多边形向圆形转变;射线的形态发生显著变化,形成长度和宽度都较为可观的裂隙,而导管的断面尺寸和形状则变化较小<sup>[79]</sup>。

在细胞壁构造层面,当热处理温度低于200℃时,木材细胞壁结构基本保持不变,但是半纤维素的降解使纤维素微纤丝的排列规则性下降,纤丝角的分布范围显著扩大,细胞壁在横向的结构与性能差异性开始缩小;当温度进一步升高,纤维素自身开始发生降解,导致微纤丝的长度缩短;当温度达到250℃左右时细胞壁在纵向与横向的性能差异开始缩小;当温度上升到300℃时,细胞壁纵向、径向和弦向的结构差异完全消失,3个方向的弹性模量也几乎相等<sup>[81]</sup>。这表明在热处理过程中木材的微观各向异性有逐渐缩小的趋势,这可能是热处理材径、弦向干缩差异减小的内在原因。

#### 4 木材热处理产业化现状

木材热处理的起源就是来自于面向工程应用的科学研究。它源于一战后美国军方有关干燥温度对航空用木材强度影响的研究<sup>[82]</sup>。美国林产品实验室的Stamm等<sup>[83-85]</sup>最早对热处理木材的尺寸稳定性、强度和热解特性进行了系统性的试验研究。然而在这一时期,热处理木材并没有获得产业化推广,因为热处理显著削弱了木材的力学强度,而人们还没有找到合适的装置与工艺来平衡物理性能提高和强度降低之间的矛盾。

热处理技术的产业化应用始于1990年代的欧洲。目前欧洲已有多种类型木材热处理技术获得

推广(表1),产能由2002年的不足5万m<sup>3</sup>增长到2011年的30万m<sup>3</sup>以上<sup>[86]</sup>。其中芬兰的Thermowood工艺无论从技术的成熟度还是市场推广机制方面都最为成功,2017年,Thermowood产量已达19.4万m<sup>3</sup><sup>[87]</sup>。在欧洲之外,热处理技术也获得了规模性推广。2012年加拿大有7家热处理材企业,美国有10家<sup>[49]</sup>,年产量超过10万m<sup>3</sup><sup>[88]</sup>。中国木材热处理的年产能尚无全面统计数据,但保守估计在10万m<sup>3</sup>以上。

木材热处理技术之所以获得较为成功的推广,一方面是得益于广泛而深入的基础研究,另一方面也因为它在装置和工艺上具有环境友好、成本低、操作简便等优点。

一套完整的木材热处理系统由4部分构成,包括锅炉、热处理窑、排气净化装置和控制系统(图3)。这套系统简单明了,在工艺上无需施加任何化学药剂,环境排放有限,在构成上与传统的木材干燥系统具有很大相似性。实际上,热处理窑本身也可承担木材的高温干燥任务,因而在环境、成本和技术上的推广较为容易。热处理的运行成本也较低,一套20m<sup>3</sup>热处理系统的装机容量约在500

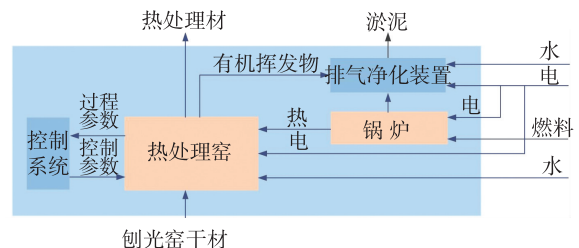


图3 木材热处理系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of wood heat treatment system



kW,处理时间一般不超过3 d(表1),因而产品价格也易为市场所接受。

## 5 展 望

木材热处理虽然已经进行了持续深入的研究,产品也获得广泛的应用,但目前仍存在一些需要解决的问题,在基础研究和产品性能上都有进一步提高的空间:

1)热处理最大的缺陷是对木材力学性能的削弱,这使它难以应用于承重性构件。从机理上说,热处理材稳定性和耐久性的提高与强度的降低都与半纤维素的降解密切相关,因而这一矛盾具有一定的不可调和性。但是通过工艺创新和优化,可以在很大程度上改善这一问题。在200℃以下,热处理材的部分力学性能因为细胞壁组分比重和结构的变化甚至可能获得提升,因而可以根据特定的树种和用途对热处理工艺进行精细化调整,进一步优化产品性能。另外,将木材热处理与表面压缩结合也是提高热处理材力学性能的有益探索<sup>[89]</sup>;还有研究尝试在热处理过程中使木材的表层与芯层处于不同的改性水平,在表层实现改性的同时使芯层的力学性能保持不变,以获得较为综合的性能提升<sup>[90]</sup>。目前除了热处理-表面压缩联合处理方面已有较为深入的研究外,其余多还处于初期探索阶段,还有很多空白需要填补。

2)对热处理材色稳定性增强的研究具有很高应用价值。热处理材与未处理材在长时间光照后表面化学组分趋于相同,两者表面润湿性等界面性能也没有显著差异<sup>[25]</sup>,这表明外部气候条件会严重损害热处理材的结构和材性的稳定性。材色调节是木材热处理越来越广泛的一种应用,可以模拟进口热带材树种外观。在当前国产材种类和数量都极为有限的情况下应用前景尤为可观,而材色稳定性是热处理技术在这一领域应用需要解决的关键问题,它首先有赖于对主要应用材种的构成与材性分析,更需要对热处理的材色调节机制进行进一步的探索。

3)木材热处理硬件系统有待进一步完善。木材热处理的条件比常规干燥苛刻得多,处理设备需承受更高的温度和腐蚀性,目前国产热处理装置在选材和制造方面的标准较低,产品在使用4~5年后壳体普遍出现问题。此外,木材热处理过程中有机挥发物排放水平远高于常规干燥,应配备废气净化处理装置。目前欧洲企业在这点上较为规范,如Thermowood系统采用燃烧净化装置,Plato系统采

用喷淋净化装置,而我国木材热处理系统的这一环节长期缺失,生产厂商和设备供应商及早完善处理系统,减少过程排放。

木材热处理是一种兼具理论深度和应用广度的木材改性技术,目前已逐渐建立起一个较为完整的技术和理论体系,但相关的研究仍然十分活跃,研究的深入性与细分性也越来越强。此外,它对竹产品和人造板产品的创新与提升也产生了有益启发,并激发了诸多研究和产出了许多成果。因此,木材热处理研究与应用在相当长一段时间内仍具有继续深入和拓展的空间,需要做和可以做的工作仍然很多。

### 参考文献(References):

- [1] PONCSAK S, KOCAEFE D, BOUZAZRA M, et al. Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*) [J]. Wood Science and Technology, 2006, 40(8): 647-663. DOI: 10.1007/s00226-006-0082-9.
- [2] HAKKOU M, PETRISSANS M, ZOULALIAN A, et al. Investigation of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis [J]. Polymer Degradation and Stability, 2005, 89(1): 1-5. DOI: 10.1016/j.polydegradstab.2004.10.017.
- [3] 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. DOI: 10.13360/j.issn.2096-1359.2016.05.003.  
DING T, WANG C J, PENG W W. A theoretical study of moisture sorption behavior of heat-treated pine wood using Raman spectroscopic analysis [J]. Journal of Forestry Engineering, 2016, 1(5): 15-19.
- [4] JALALUDIN Z, HILL C, XIE Y. Analysis of the water vapour sorption isotherms of thermally modified acacia and sesendok [J]. Wood Material Science & Engineering, 2010, 5(3/4): 194-203. DOI: 10.1080/17480272.2010.503940.
- [5] 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(自然科学版),2010,34(3):113-116. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2010.03.023.  
TU D Y, WANG M J, GU L B, et al. Effect of super-high temperature heat treatment on *Fraxinus mandshurica* board's dimension stability [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2010, 34(3): 113-116.
- [6] LI T, CHENG D, AVRAMIDIS S, et al. Response of hygroscopicity to heat treatment and its relation to durability of thermally modified wood [J]. Construction and Building Materials, 2017, 144: 671-676. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.218.
- [7] PFRIEM A, ZAUER M, WAGENFUHR A. Alteration of the unsteady sorption behaviour of maple (*Acer pseudoplatanus* L.) and spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) due to thermal modification [J]. Holzforschung, 2010, 64(2): 235-241. DOI: 10.1515/HF.2010.029.
- [8] HILL C. Wood modification: chemical, thermal and other processes [M]. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2006.
- [9] CERMAK P, VAHTIKARI K, RAUTKARI L, et al. The effect of wetting cycles on moisture behavior of thermally modified Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood [J]. Journal of Materials Science,

- 2016, 51(3): 1504-1511. DOI: 10.1007/s10853-015-9471-5.
- [10] ALTGEN M, MILITZ H. Influence of process conditions on hygroscopicity and mechanical properties of European beech thermally modified in a high-pressure reactor system[J]. *Holzforschung*, 2016, 70(10): 971-979. DOI:10.1515/hf-2015-0235.
- [11] ENDO K, OBATAYA E, ZENIYA N, et al. Effects of heating humidity on the physical properties of hydrothermally treated spruce wood[J]. *Wood Science and Technology*, 2016, 50(6): 1161-1179. DOI:10.1007/s00226-016-0822-4.
- [12] CAO Y, LU J, HUANG R, et al. Increased dimensional stability of Chinese fir through steam-heat treatment[J]. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2012, 70(4): 441-444. DOI:10.1007/s00107-011-0570-y.
- [13] 丁涛, 顾炼百, 蔡家斌. 热处理对木材吸湿特性及尺寸稳定性的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(2): 143-147. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2015.02.025. DING T, GU L B, CAI J B. Effects of heat treatment on the moisture adsorption characteristic and dimensional stability of wood[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2015, 39(2): 143-147.
- [14] ESTEVES B, DOMINGOS I, PEREIRA H. Improvement of technological quality of eucalypt wood by heat treatment in air at 170-200 °C[J]. *Forest Product Journal*, 2007, 57(1): 47-52. DOI:10.1007/s00226-006-0098-1.
- [15] ESTEVES B, MARQUES V, DOMINGOS I, et al. Influence of steam heating on the properties of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood[J]. *Wood Science and Technology*, 2007, 41(3): 193-207. DOI:10.1007/s00226-006-0099-0.
- [16] CANDELIER K, HANNOUZ S, THEVENON M, et al. Resistance of thermally modified ash (*Fraxinus excelsior* L.) wood under steam pressure against rot fungi, soil-inhabiting micro-organisms and termites[J]. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2017, 75(2): 249-262. DOI:10.1007/s00107-016-1126-y.
- [17] SUSTERSIC Z, MOHAREB A, CHAOUCH M, et al. Prediction of the decay resistance of heat treated wood on the basis of its elemental composition[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2010, 95(1): 94-97. DOI: 10.1016/j.polyimdegradstab.2009.10.013.
- [18] CANDELIER K, DUMARCAY S, PETRISSANS A, et al. Comparison of chemical composition and decay durability of heat treated wood cured under different inert atmospheres: nitrogen or vacuum[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2013, 98(2): 677-681. DOI: 10.1016/j.polyimdegradstab.2012.10.022.
- [19] 顾炼百, 丁涛, 吕斌, 等. 压力蒸汽热处理木材生物耐久性的研究[J]. *林产工业*, 2010, 37(5): 6-9. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5299.2010.05.002. GU L B, DING T, LYU B, et al. Study on biological durability of pressurized steam-treated wood[J]. *China Forest Products Industry*, 2010, 37(5): 6-9.
- [20] 李晓文, 李民, 秦韶山, 等. 高温热改性橡胶木的生物耐久性[J]. *林业科学*, 2012, 48(4): 108-112. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20120418. LI X W, LI M, QIN S S, et al. Biological durability of heat-treated rubber wood[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(4): 108-112.
- [21] KAMDEM D, PIZZI A, JERMANNAUD A. Durability of heat-treated wood[J]. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 2002, 60(1): 1-6. DOI:10.1007/s00107-001-0261-1.
- [22] 李涛, 顾炼百, 江宁. 高温热处理对水曲柳材色的影响[J]. *林业科学*, 2009, 45(12): 149-153. DOI: 10.3321/j.issn:1001-7488.2009.12.026. LI T, GU L B, JIANG N. Effect of high temperature heat treatment on ash wood color[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(12): 149-153.
- [23] 丁涛, 彭文文, 李涛. 基于 FT-IR 和 XPS 的热处理白蜡木材色变化机理[J]. *林业工程学报*, 2017, 2(5): 25-30. DOI: 10.13360/j.issn.2096-1359.2017.05.005. DING T, PENG W W, LI T. Mechanism of color change of heat-treated white ash wood by means of FT-IR and XPS analyses[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2017, 2(5): 25-30.
- [24] HUANG X, KOCAEFE D, KOCAEFE Y. Aspects of colorimetric and chemical study on color modification of heat-treated wood during artificial weathering[J]. *Applied Surface Science*, 2012, 258(14): 5360-5369. DOI: 10.1016/j.apsusc.2012.02.005.
- [25] HUANG X, KOCAEFE D, KOCAEFE Y, et al. Study of the degradation behavior of heat-treated jack pine (*Pinus banksiana*) under artificial sunlight irradiation[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2012, 97(7): 1197-1214. DOI: 10.1016/j.polyimdegradstab.2012.03.022.
- [26] AYADI N, LEJEUNE F, CHARRIER F, et al. Color stability of heat-treated wood during artificial weathering[J]. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 2003, 61(3): 221-226. DOI:10.1007/s00107-003-0389-2.
- [27] 郭飞, 黄荣凤, 余钢. 热处理和改性 PU 漆对木材光变色性能的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(2): 169-173. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2015.02.029. GUO F, HUANG R F, YU G. Effects of heat treatment and modified PU coating on photo-induced discoloration of wood[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2015, 39(2): 169-173.
- [28] GEORGE B, SUTTIE E, MERLIN A, et al. Photodegradation and photostabilisation of wood-the state of the art[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2005, 88(2): 268-274. DOI: 10.1016/j.polyimdegradstab.2004.10.018.
- [29] KUBOJIMA Y, OKANO T, OHTA M. Bending strength and toughness of heat-treated wood[J]. *Journal of Wood Science*, 2000, 46(1): 8-15. DOI:10.1007/BF00779547.
- [30] KOCAEFE D, PONSČAK S, BOLUK Y. Effect of thermal treatment on the chemical composition and mechanical properties of birch and aspen[J]. *BioResources*, 2008, 3(2): 517-537. DOI:10.1016/S0016-7037(00)00094-2.
- [31] GUO F, HUANG R, LU J. Evaluating the effect of heat treating temperature and duration on selected wood properties using comprehensive cluster analysis[J]. *Journal of Wood Science*, 2014, 60(4): 255-262. DOI:10.1007/s10086-014-1403-5.
- [32] DING T, GU L, LI T. Influence of steam pressure on physical and mechanical properties of heat-treated Mongolian pine lumber[J]. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2010, 69(1): 121-126. DOI:10.1007/s00107-009-0406-1.
- [33] 李涛, 顾炼百. 185 °C 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. DOI: 10.3321/j.issn:1001-7488.2009.02.017. LI T, GU L B. Effects of high temperature heat treatment at 185 °C on mechanical properties of ash wood[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(2): 92-97.
- [34] 李延军, 唐荣强, 鲍滨福, 等. 高温热处理杉木力学性能与尺寸稳定性研究[J]. *北京林业大学学报*, 2010, 32(4): 232-236. DOI:10.13332/j.1000-1522.2010.04.049. LI Y J, TANG R Q, BAO B F, et al. Mechanical properties and

- dimensional stability of heat-treated Chinese fir [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(4): 232-236.
- [35] OBATAYA E. Effects of natural and artificial ageing on the physical and acoustic properties of wood in musical instruments [J]. Journal of Cultural Heritage, 2017, 27: S63-S69. DOI: 10.1016/j.culher.2016.02.011.
- [36] KUBOJIMA Y, OKANO T, OHTA M. Vibrational properties of Sitka spruce heat-treated in nitrogen gas [J]. Journal of Wood Science, 1998, 44(1): 73-77. DOI: 10.1007/BF00521878.
- [37] ZAUER M, KOWALESKI A, SPROSSMANN R, et al. Thermal modification of European beech at relatively mild temperatures for the use in electric bass guitars [J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2016, 74: 43-48. DOI: 10.1007/s00107-015-0973-2.
- [38] ZENIYA N, ENDO-UJIE K, OBATAYA E, et al. Effects of water-soluble extractives on the vibrational properties and color of hydrothermally treated spruce wood [J]. Wood Science and Technology, 2019, 53(1): 151-164. DOI: 10.1007/s00226-018-1069-z.
- [39] KRUGER R, ZAUER M, WAGENFUHR A. Physical properties of native and thermally treated European woods as potential alternative to Indian rosewood for the use in classical guitars [J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2018, 76(6): 1663-1668. DOI: 10.1007/s00107-018-1345-5.
- [40] DING T, GUO X, ZHONG G, et al. Size distribution of heat-treated mongolian oak sawdust [C] // Proceedings of the 19th International Wood Machining Seminar. Nanjing, China, 2009.
- [41] AYTIN A, KORRUT S. Effect of thermal treatment on the swelling and surface roughness of common alder and wych elm wood [J]. Journal of Forest Research, 2016, 27(1): 225-229. DOI: 10.1007/s11676-015-0136-7.
- [42] DING T, GU L, ZHU N, et al. Influence of wood heat treatment on cutting tool temperature, surface quality and dust size distribution of Mongolian pine wood [C] // Proceedings of the 20th International Wood Machining Seminar. Skellefteå, Sweden, 2011.
- [43] ALTGEN M, MILITZ H. Thermally modified Scots pine and Norway spruce wood as substrate for coating systems [J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2017, 14(3): 531-541. DOI: 10.1007/s11998-016-9871-8.
- [44] 顾炼百, 丁涛, 王明俊, 等. 高温热处理木材胶合性能的研究 [J]. 林产工业, 2010, 37(2): 15-18. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5299.2010.02.004.
- GU L B, DING T, WANG M J, et al. Study on bonding performance of high-temperature heat-treated wood [J]. China Forest Products Industry, 2010, 37(2): 15-18.
- [45] FERREIRA J, ESTEVES B, NUNES L, et al. Life cycle assessment of thermally treated and untreated maritime pine boards; a Portuguese case study [C] // Proceedings of the 7th European Conference on Wood Modification. Lisbon, Portugal, 2014.
- [46] ALA-VIIKARI J. Executive summary-thermowood; life cycle assessment (LCA) of finnish thermally modified wood cladding [R]. Espoo; Koivuniemi Ltd, 2008.
- [47] LABAT G, BUCKET E, LEGAY S, et al. Environmental characterization of ratification process by-products (liquid and gaseous wastes) [C] // Proceedings of the 6th International Symposium "Environment and Wood Preservation". Cannes-Mandelieu, France, 2005.
- [48] MANNINEN A, PASANEN P, HOLOPAINEN J. Comparing the VOC emissions between air-dried and heat-treated Scots pine wood [J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(11): 1763-1768. DOI: 10.1016/s1352-2310(02)00152-8.
- [49] SANDBER D, KUTNAR A. Thermally modified timber; recent developments in Europe and North America [J]. Wood and Fiber Science, 2016, 48: 28-39.
- [50] ALEN R, KOTILAINEN R, ZAMAN A. Thermochemical behavior of Norway spruce (*Picea abies*) at 180-225 °C [J]. Wood Science and Technology, 2002, 36(2): 163-171. DOI: 10.1007/s00226-001-0133-1.
- [51] SUNDQVIST B, KARLSSON O, WESTERMARK U. Determination of formic-acid and acetic acid concentrations formed during hydrothermal treatment of birch wood and its relation to colour, strength and hardness [J]. Wood Science and Technology, 2006, 40: 549-561. DOI: 10.1007/s00226-006-0071-z.
- [52] HAKKOU M, PETRISSANS M, GERARDIN P, et al. Investigations of the reasons for fungal durability of heat-treated beech wood [J]. Polymer Degradation and Stability, 2006, 91(2): 393-397. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2004.04.042.
- [53] PARK Y, JANG S, PARK J, et al. Changes of major chemical components in larch wood through combined treatment of drying and heat treatment using superheated steam [J]. Journal of Wood Science, 2017, 63(6): 635-643. DOI: 10.1007/s10086-017-1657-9.
- [54] DING T, GU L, LIU X. Influence of steam pressure on chemical changes of heat-treated Mongolian pine lumber [J]. BioResources, 2011, 6(2): 1880-1889. DOI: 10.5552/drind.2011.1106.
- [55] BORREGA M, KARENLAMPI P. Effect of relative humidity on thermal degradation of Norway spruce (*Picea abies*) wood [J]. Journal of Wood Science, 2008, 54(4): 323-328. DOI: 10.1007/s10086-008-0953-9.
- [56] JIANG J, LU J, ZHOU Y, et al. Optimization of processing variables during heat treatment of oak (*Quercus mongolica*) wood [J]. Wood Science and Technology, 2014, 48(2): 253-267. DOI: 10.1007/s00226-013-0600-5.
- [57] ROSEN H, BODKIN R. Steam drying lumber above atmospheric pressure [C] // Proceedings of the 23rd Western Dry Kiln Clubs. Covallis, USA, 1981.
- [58] CANDELIER K, DUMARCAY S, PETRISSANS A, et al. Comparison of mechanical properties of heat treated beech wood cured under nitrogen or vacuum [J]. Polymer Degradation and Stability, 2013, 98(9): 1762-1765. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.05.026.
- [59] YILDIZA S, GEZERB E, YILDIZA U. Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat [J]. Building and Environment, 2006, 41(12): 1762-1766. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.07.017.
- [60] JOHANSSON D, MOREN T. The potential of colour measurement for strength prediction of thermally treated wood [J]. Holz als Roh- und Werkstoff, 2006, 64(2): 104-110. DOI: 10.1007/s00107-005-0082-8.
- [61] WALKER J. Primary wood processing, principles and practices [M]. 2nd ed. Dordrecht; Springer, 2006.
- [62] ROWELL R. Handbook of wood chemistry and wood composites [M]. Boca Raton; CRC Press, 2005.
- [63] TJEERDSMA B, MILITZ H. Chemical changes in hydrothermally treated wood; FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood [J]. Holz als Roh- und Werkstoff, 2005, 63(2): 102-111. DOI: 10.1007/s00107-004-0532-8.
- [64] KYMALAINEN M, MLOUKA S B, BELT T, et al. Chemical, water vapour sorption and ultrastructural analysis of Scots pine wood thermally modified in high pressure reactor under saturated steam [J]. Journal of Materials Science, 2018, 53(4): 3027-



3037. DOI:10.1007/s10853-017-1714-1.
- [65] WEILAND J, GUYONNET R. Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy[J]. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 2003, 61(3): 216-220. DOI:10.1007/s00107-003-0364-y.
- [66] HUGHES M, HILL C, PFRIEM A. The toughness of hygrothermally modified wood: a review [J/OL]. *Holzforschung*, 2015. DOI:10.1515/hf-2014-0184.
- [67] SALCA E, KOBORI H, INAGAKI T, et al. Effect of heat treatment on colour changes of black alder and beech veneers [J]. *Journal of Wood Science*, 2016, 62(4): 297-304. DOI:10.1007/s10086-016-1558-3.
- [68] LIN B, COLIN B, CHEN W, et al. Thermal degradation and compositional changes of wood treated in a semi-industrial scale reactor in vacuum [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2018, 130: 8-18. DOI:10.1016/j.jaap.2018.02.005.
- [69] WIKBERG H, MAUNU S. Characterisation of thermally modified hard- and softwoods by <sup>13</sup>C CP/MAS NMR [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2004, 58(4): 461-466. DOI:10.1016/j.carbpol.2004.08.008.
- [70] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8101.2012.02.007.  
DING T, BEI Z T, LI Y. Influence of heat treatment on crystallinity and mechanical properties of Chinese fir lumber [J]. *China Forestry Science and Technology*, 2012, 26(2): 23-26.
- [71] YIN Y, BERGLUND L, SALMEN L. Effect of steam treatment on the properties of wood cell walls [J]. *Biomacromolecules*, 2011, 12(1): 194-202. DOI:10.1021/bm101144m.
- [72] BOONSTRA M, TJEERDSMA B. Chemical analysis of heat treated softwoods [J]. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 2006, 64: 204-211. DOI:10.1007/s00107-005-0078-4.
- [73] 邓邵平, 江茂生, 陈孝云, 等. 杉木间伐材高温热处理后化学成分的变化 [J]. *林业科学*, 2009, 45(11): 121-126. DOI: 10.3321/j.issn:1001-7488.2009.11.020.  
DENG S P, JIANG M S, CHEN X Y, et al. Changing rules of components of *Cunninghamia lanceolata* thinning wood in heat treating process [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(11): 121-126.
- [74] MECCA M, D'AURIA M, TODARO L. Effect of heat treatment on wood chemical composition, extraction yield and quality of the extractives of some wood species by the use of molybdenum catalysts [J]. *Wood Science and Technology*, 2019, 53(1): 119-133. DOI:10.1007/s00226-018-1057-3.
- [75] TJEERDSMA B, BOONSTRA M, PIZZI A, et al. Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement [J]. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 1998, 56: 149-153. DOI:10.1007/s001070050287.
- [76] GONZALEZ-PENA M, HALE M. Colour in thermally modified wood of beech, Norway spruce and Scots pine. Part 1: Colour evolution and colour changes [J]. *Holzforschung*, 2009, 63(4): 385-393. DOI:10.1515/HF.2009.078.
- [77] KAMDEM D P, PIZZI A, TRIBOULOT M C. Heat-treated timber: potentially toxic byproducts presence and extent of wood cell wall degradation [J]. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 2000, 58(4): 253-257. DOI:10.1007/s001070050420.
- [78] BOONSTRA M J, ACKER J V, KEGEL E, et al. Optimisation of a two-stage heat treatment process: durability aspects [J]. *Wood Science and Technology*, 2007, 41(1): 31-57. DOI:10.1007/s00226-006-0087-4.
- [79] BIZIKS V, ANDERSONS B, BELKOVA L, et al. Changes in the microstructure of birch wood after hydrothermal treatment [J]. *Wood Science and Technology*, 2013, 47(4): 717-735. DOI: 10.1007/s00226-013-0531-1.
- [80] DING T, ZHANG Y, WANG N, et al. Comparative study on microstructure of Mongolian pine wood thermally treated in steam condition [C]// *Proceedings of 2012 International Conference on Biobase Material Science and Engineering*. Changsha, China, 2012.
- [81] BRANDT B, ZOLLFRANK C, FRANKE O, et al. Micromechanics and ultrastructure of pyrolysed softwood cell walls [J]. *Acta Biomaterialia*, 2010, 6(11): 4345-4351. DOI: 10.1016/j.actbio.2010.05.026.
- [82] SANDBERG D, HALLER P, NAVI P. Thermo-hydro and thermo-hydro-mechanical wood processing: an opportunity for future environmentally friendly wood products [J]. *Wood Material Science & Engineering*, 2013, 8(1): 64-88. DOI:10.1080/17480272.2012.751935.
- [83] STAMM A, HANSEN L A. Minimizing wood shrinkage and swelling: effect of heating in various gases [J]. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1937, 29(7): 831-833. DOI: 10.1021/ie50312a022.
- [84] STAMM A J, BURR H K, KLINE A A. Staybwood: heat-stabilized wood [J]. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1946, 38(6): 630-634. DOI:10.1021/ie50438a027.
- [85] STAMM A. Thermal degradation of wood and cellulose [J]. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1956, 48(3): 413-417. DOI: 10.1021/ie51398a022.
- [86] 丁涛, 蔡家斌, 耿君. 欧洲木材热处理产业和标准化 [J]. *木材工业*, 2015, 29(3): 26-30. DOI:10.19455/j.mcgy.2015.03.007.  
DING T, CAI J B, GENG J. Review on thermally modified timber industry and standardization in Europe [J]. *China Wood Industry*, 2015, 29(3): 26-30.
- [87] International thermowood association. Production statistics 2017 [R/DB]. (2018-04-10) [2018-12-07] <https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.palvelee.fi/utiset/Production-statistics2017.pdf>.
- [88] UNECE. Forest products annual market review 2012-2013 [R]. Geneva, Switzerland: United Nations Economic Commission for Europe, 2013.
- [89] CAI J, YANG X, CAI L, et al. Impact of the combination of densification and thermal modification on dimensional stability and hardness of poplar lumber [J]. *Drying Technology*, 2013, 31(10): 1107-1113. DOI:10.1080/07373937.2013.775147.
- [90] CERMAK P, DOMENY J, BRABEC M. Unevenly distributed thermal treatment of wood: preliminary study-density profiles [J]. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2016, 74(4): 629-631. DOI:10.1007/s00107-016-1031-4.

(责任编辑 葛华忠)